

Urbane Niederschlagsbeeinflussung – Genese und räumliche Differenzierung am Beispiel von Berlin

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)
im Fach Geographie

eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II
der Humboldt-Universität zu Berlin

von
Dipl.-Geogr. Anja Pagenkopf
eingereicht am 15.11.2010

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Jan Olbertz
Dekan Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II:
Prof. Dr. Peter Frensch

Gutachter: 1. Prof. Dr. Wilfried Endlicher

 2. Prof. Dr. Dieter Scherer

 3. Prof. Dr. Peter C. Werner

Datum der Promotion: 24.01.2011

Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Niederschlagsklima der Stadt Berlin und des Umlandes in Brandenburg für den Zeitraum 1951-2000 analysiert. Insbesondere werden klimatologisch signifikante räumliche Strukturen der Niederschlagsverteilung untersucht, die durch Wirkung des urbanen Raumes verursacht werden. Für die Analyse im Untersuchungsgebiet von 60 Kilometern um das Stadtzentrum werden Primärdaten von 247 Niederschlagsmessstationen aus dem erweiterten Bereich zwischen $51,5^\circ$ und $53,5^\circ$ nördlicher Breite sowie 12° und 15° östlicher Länge verwendet. Aus den gemessenen Niederschlagssummen werden Gebietsmittelwerte für 636 administrative Teilflächen ($> 20 \text{ km}^2$) sowie für 12 Teilflächen eines zur mittleren Windrichtung des Niederschlagstages parallelen Analyse-Transektivs für jeden der 11848 Niederschlagstage interpoliert.

Als Grundlage für die Klassifizierung der klimatologischen Randbedingungen und der Wetterverhältnisse wurden acht Atmosphärenparameter festgelegt, die aus den Daten der Wetterstation Berlin-Tempelhof, des NCEP/NCAR Reanalysedatensatzes sowie aus den Wetterkartenanalysen des Meteorologischen Instituts der FU Berlin aufbereitet wurden. Für 17 ausgewählte Kombinationen der Atmosphärenparameter wurde der Niederschlagsdatensatz zu klassifizierten Teilmengen gruppiert und als eigenständige aber teilweise überlappende geostatistische Experimente ausgewertet.

Die Spannweite der in den einzelnen Experimenten verglichenen Gebietsmittelwerte überschreitet in der Regel 10 Prozent der mittleren Niederschlagshöhen nicht. Der dominierende Faktor für die Herausbildung unterscheidbarer räumlicher Niederschlagsverteilungen im Untersuchungsgebiet ist die Windrichtung in der unteren Troposphäre. In einigen Experimenten können städtische Modifikationen unterschiedlichen Charakters nachgewiesen werden. Für die Mehrheit der Tage, an denen der Niederschlag als Schauer fällt, kann eine positive Leeanomalie bestätigt werden. Bei jahreszeitlicher Betrachtung der Schauerniederschläge tritt eine Verstärkung im Winter klarer zum Vorschein als im Sommer, bedingt durch die im Winter häufiger auftretenden SW-Winde sowie durch im Vergleich zum Sommer weniger intensiv und häufig entstehende Konvektionsniederschläge. Ein synoptischer Gradient von Nordwest nach Südost abnehmender Niederschlagshöhen ist bestimmend für die Niederschlagsverteilung an Tagen mit Frontpassagen beziehungsweise an den Tagen mit Advektionsniederschlägen. Innerhalb dieses Trends bildet sich über dem Stadtgebiet sehr häufig eine zusätzliche regionale Senke aus.

Während sich der Stadtkörper unter Bedingungen, die kleinräumige Niederschlagsentstehung begünstigen, im Mittel lokal verstärkend auswirkt, kommt es bei großräumig gesteuerter Niederschlagsentstehung über dem Stadtgebiet zu einer Verringerung der Tagessummen des fallenden Niederschlags. Die für Berlin durchgeführten Experimente weisen darauf hin, dass die urbane Verstärkung durch intensivierte Niederschlagsbildung über der Stadt bedingt wird, während die urbane Verminderung aus der Veränderung des Niederschlagsgeschehens innerhalb der Stadtatmosphäre resultiert.

Abstract

An analysis of the precipitation climate was carried out at the sample site Berlin and its surrounding areas in Brandenburg for a period from 1951 to 2000. Special attention was directed to climatologically significant spatial structures resulting from urban modification of the precipitation distribution. The investigated area with a radius of 60 kilometres from the city centre is embedded in the wider region of data background between 51,5° to 53,5° North and 12° to 15° East. For the 11848 precipitation days the daily sums of 247 measurement sites are interpolated into mean areal precipitation for 636 administrative sub regions ($> 20 \text{ km}^2$) as well as for 12 elements of transects placed parallel to the mean daily wind direction (ACAT).

Eight atmospheric parameters are selected to describe and classify the general climatologic and weather conditions. The required data originate from weather observations at the intra-urban airport Berlin-Tempelhof, from the NCAR/NCEP reanalyse dataset and from weather maps of the Meteorological Institute of the Freie Universität Berlin. 17 combinations of the atmospheric parameters were used to group the precipitation data into classified subsets. These subsets are treated as data resulting from independent but partly overlapping geostatistic experiment configurations.

The mean range of interpolated precipitations does not exceed 10 percent of the respective mean precipitation height in the particular experiments. The dominant synoptic factor causing the evidence of distinguishable spatial precipitation structures appears to be the wind direction in the lower troposphere. From several experiments mainly two types of urban modification to precipitation distribution could be detected. For the majority of days with convective precipitation a positive lee anomaly was confirmed. A seasonally differentiated analysis of days with shower events showed a more distinct lee maximum in the precipitation distribution in winter than in summer, caused by the increasing occurrence of SW winds in winter and the less intense and frequent convective precipitation events compared to summer conditions. A large-scale decreasing precipitation gradient directed from Northwest to Southeast is the determining factor as well for days with passage of weather fronts over Berlin as for days with advective precipitation. Within the mean gradient a regional minimum occurs regularly in the urban area.

At weather conditions inducing local precipitation genesis the urban body induces predominantly locally intensified precipitation heights. When precipitation is formed mainly by synoptic processes the daily precipitation is being reduced over the city region. The experiment layouts related to these observations indicate that urban precipitation amplification evolves from intensified generation processes while urban reduction results from modified conditions for precipitation falling through the urban atmosphere.

Schlagwörter: Stadtklima, Niederschlag, Berlin, Gebietsniederschlag, klassifizierte Wetterverhältnisse, ACAT

Keywords: Urban Climate, precipitation, Berlin, areal precipitation, classified weatherconditions, ACAT

Danksagung

Es sei hiermit allen, auch nachfolgend nicht Genannten, gedankt, die direkt und indirekt zur Entstehung und Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt an erster Stelle meinem Doktorvater Prof. Dr. Wilfried Endlicher, Geographisches Institut der Humboldt-Universität zu Berlin, der die Auswahl des Themas unterstützt hat und stets Förderer der vorliegenden Arbeit war. Besonders möchte ich mich bei Prof. Endlicher für das meiner Arbeit entgegengebrachte große Vertrauen bedanken. Als mein Vorgesetzter hat er die arbeitsorganisatorischen Rahmenbedingungen geschaffen, um die universitäre Arbeit, die Lehrverpflichtungen und Familie in Übereinstimmung zu bringen.

Für die Zusage zur Begutachtung der vorliegenden Arbeit danke ich Prof. Dr. Peter C. Werner und Prof. Dr. Dieter Scherer.

Für die Überlassung der Datengrundlage an Niederschlagsdaten möchte ich mich bei Prof. Dr. Friedrich-Wilhelm Gerstengabe, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, bedanken. Frau Gies, Deutscher Wetterdienst, danke ich dafür, dass sie mir im Rahmen meiner Diplomarbeit den Zugang zum Archiv in Potsdam ermöglichte. Prof. Dr. Uwe Ulbrich, Meteorologisches Institut der Freien Universität Berlin, hat mir die Luftmassendaten zur Verfügung gestellt, wofür ich ihm danke.

Des Weiteren möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen in der Abteilung Klimatologie und des Geographischen Instituts herzlich, für ihre Diskussionsbereitschaft und die ermutigenden Worte während der Erstellung der Arbeit danken. Bei Dr. Marcel Langner und Dipl.-Geogr. Marlén Herbrich bedanke ich mich besonders für die fachlich anregenden Gespräche.

Für das Gegen- und Korrekturlesen danke ich Dr. Marcel Langner, Dipl.-Geogr. Marlén Herbrich und Dr. Reinhard Kleßen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Tochter Deborah für ihr Lächeln, meinem Lebensgefährten Ferdinand für sein Entgegenkommen und seine Unterstützung, meiner Mama für ihr Vorbild und meinem Papa für die Diskussionsbereitschaft sowie Anregungen, insbesondere bei der Fehlersuche während der notwendigen Softwareentwicklung.

Berlin, den 15. November 2010

Anja Pagenkopf

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Zusammenfassung..... | II |
| Abstract..... | III |
| Danksagung..... | IV |
| Abkürzungsverzeichnis | VIII |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Erdoberflächen-Atmosphären-Interaktion | 1 |
| 1.2 Orographische Niederschlagsbeeinflussung | 1 |
| 1.3 Urbane Niederschlagsbeeinflussung..... | 2 |
| 1.4 Fragestellung und Motivation..... | 3 |
| 1.5 Untersuchungskonzept | 5 |
| 2 Untersuchungsgebiet..... | 9 |
| 3 Daten und Methoden | 17 |
| 3.1 Berliner Niederschlagsdatensatz | 17 |
| 3.1.1 Vorbereitung der Niederschlagsmessungen..... | 19 |
| 3.1.2 Flächeninterpolation..... | 19 |
| 3.1.3 ACAT | 21 |
| 3.1.4 Ableitung vergleichbarer Analysegrößen | 23 |
| 3.1.5 technische Umsetzung der Datenverarbeitungsschritte | 24 |
| 3.2 Einflussgrößen..... | 27 |
| 3.2.1 Niederschlagsdaten | 27 |
| 3.2.2 Daten aus synoptischen Augenbeobachtungen an einer Wetterstation | 28 |
| 3.2.3 Reanalysedaten..... | 30 |
| 3.2.4 Wetterkarte | 32 |
| 3.2.5 Großwettertypen..... | 34 |
| 3.2.6 Jahreszeiten | 34 |
| 3.2.7 Landnutzung/ Landbedeckung | 35 |
| 3.2.8 Geländemodell | 36 |
| 4 Auswertung..... | 37 |
| 4.1 Einfaktorielles Experiment: Niederschlagstyp..... | 41 |
| 4.2 Einfaktorielles Experiment: Reproduzierbarkeit am Beispiel Niederschlagstyp | 44 |
| 4.3 Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit | 47 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.4 | Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, städtische Wärmeinsel..... | 48 |
| 4.5 | Dreifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit, städtische Wärmeinsel..... | 50 |
| 4.6 | Einfaktorielles Experiment: Niederschlagsintensität | 52 |
| 4.7 | Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität..... | 55 |
| 4.8 | Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit..... | 57 |
| 4.9 | Einfaktorielles Experiment: Frontpassage | 58 |
| 4.10 | Zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Jahreszeit | 62 |
| 4.11 | Zweifaktorielles Experiment Niederschlagstyp, Frontpassage | 63 |
| 4.12 | Einfaktorielles Experiment: Vertikalbewegung | 64 |
| 4.13 | Zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit | 65 |
| 4.14 | Einfaktorielles Experiment: Windrichtung | 67 |
| 4.15 | Zweifaktorielles Experiment: Frontdurchgang, Windrichtung..... | 70 |
| 4.16 | Einfaktorielles Experiment: Luftmassen | 71 |
| 4.17 | Einfaktorielles Experiment: Großwettertyp..... | 72 |
| 4.18 | Resümee der Experimentauswertungen..... | 73 |
| 5 | <i>Diskussion</i> | 75 |
| 5.1 | Literaturvergleich | 75 |
| 5.2 | Niederschlagsabschwächung bei Advektionsniederschlag | 80 |
| 5.3 | Orographieeffekt..... | 83 |
| 5.4 | Konvektionsverstärkung..... | 84 |
| 5.5 | Windeinfluss | 86 |
| 5.6 | Bedeutung und Gegenüberstellung der atmosphärischen Einflussfaktoren für die Niederschlagsverteilung | 89 |
| 6 | <i>Ausblick</i> | 92 |
| 7 | <i>Zusammenfassung</i> | 93 |
| 8 | <i>Abbildungsverzeichnis</i> | 99 |
| 9 | <i>Tabellenverzeichnis</i> | 101 |
| 10 | <i>Kartenverzeichnis</i> | 102 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| <i>Literaturverzeichnis</i> | 103 |
| <i>Erklärung</i> | 106 |
| <i>Anhang</i> | 107 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------|--|
| ACAT | Adaptive Climatologic Analysis Transect |
| IDC | Implemented Data Collection |
| RGa | relative Gebietsanomalie |
| UHI | Urban Heat Island (städtische Wärmeinsel) |
| UIP | Urban Impact on Precipitation |
| | |
| AOI | Area of Interest |
| BWB | Berliner Wasserbetriebe |
| DEM90m | Digital Elevation Model 90m Resolution |
| DFD | Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum |
| DLR | Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| ESRL | Earth System Research Laboratory |
| GWL | Großwetterlagen |
| GWT | Großwettertyp |
| IDW | Inverse Distance Weighting |
| METROMEX | Metropolitan Meteorological Experiment |
| NASA | National Aeronautics and Space Agency |
| NCAR | National Center for Atmospheric Research |
| NCEP | National Centers for Environmental Prediction |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| SQL | Structured Query Language |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| SYNOP | synoptische Observation (Wortstamm von "synchron" und "optisch") |
| UBA | Umweltbundesamt |
| WMO | World Meteorological Organisation |
| | |
| h_{GA} | Gebietsanomalie |
| h_{GG} | Niederschlagshöhe im Teilgebiet |
| h_{TG} | Niederschlagshöhe im Gesamtgebiet |
| h_{AEi} | Niederschlagshöhe in einem ACAT Element |
| h_{AEit} | Niederschlagshöhe in einem ACAT Element an einem Tag t |
| h_{AE} | Niederschlagshöhe des ACAT Mittelwertes |
| NV | Niederschlagsvariation |
| RA | prozentualer Anteil der Gesamtschwankungsbreite |

1 Einleitung

1.1 Erdoberflächen-Atmosphären-Interaktion

Die Wechselwirkungen mit der Erdoberfläche bestimmen in entscheidendem Maße die Ausprägungen der Klimaelemente der Erdatmosphäre. Die Temperatur der Troposphäre ist direkt abhängig von der Eigenschaft der Erdoberfläche, die eingehende Strahlungsenergie zu transformieren. Der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre wird durch die Verdunstung an der Erdoberfläche bestimmt. Luftdruckausgleich in der synoptischen und der Mesoskala entsteht durch den Reibungseinfluss der Erdoberfläche auf den Wind. Die in der Gashölle ablaufenden Prozesse hingegen unterliegen den allgemeingültigen Regeln der Thermo- und Fluidodynamik kompressibler Medien. Die Prozesse in der Atmosphäre sind im Gegenzug ein elementarer Einflussfaktor auf die Gestalt der Landoberfläche, wie unter anderem ausführlich von Julius Büdel (1981) beschrieben. Auf der Basis der engen Wechselbeziehung zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre ist eine Bearbeitung raumbezogener, klimatologischer Fragestellungen angebracht. Neben einem Modellierungsansatz ist ein empirisch exploratives Vorgehen für Beispielgebiete zweckmäßig. Verallgemeinerungen im Zusammenspiel mit dem prozessanalytischen Ansatz der Meteorologie sind in diesem Rahmen nur äußerst eingeschränkt vorzunehmen, da jeder Raum nur einige seiner vielen Eigenschaften mit jeweils anderen gemeinsam aufweist. Dennoch ist es Ziel klimatologischer Forschung, übertragbare Erkenntnisse zu erhalten, indem einzelne Faktoren mit ihren Eigenschaften und Auswirkungen bestimmt werden und in einem neuen Kontext im Zusammenspiel mit vielen anderen Faktoren bestätigt werden. Der relative Anteil des analysierten Einflussfaktors am lokalen Klima bleibt jedoch weiterhin abhängig von dem Gesamtbild und besonders lokal wirkenden limitierenden Faktoren auf die Prozesskette.

1.2 Orographische Niederschlagsbeeinflussung

Die Wechselbeziehungen zwischen Erdoberfläche und Niederschlagsgeschehen sind vielfältig. Für die Außertropen wurde allgemeingültig festgestellt, dass in Gebirgen die Niederschlagssumme mit der Höhe zunimmt (Weischet und Endlicher, 2008). Auf der Nordseite der Alpen wird ein hygrischer Gradient von zirka 4 mm / 100 m nachgewiesen. Für dieses Gebirge ist die freie advektive Hebung der dominante Niederschlagsbildungsprozess, der durch das orographisch erzwungene Aufsteigen weiter verstärkt wird. Unter Einschränkungen kann diese Erkenntnis in eine kleinere Raumskala übertragen werden. Kleinere Gebirge, wie zum Beispiel der Harz (Brocken 1141 m) bis hin zu Erhöhungen wie dem Fläming (Hagelberg 200 m) weisen ebenfalls räumlich zuordenbare Niederschlagszunahmen mit der Höhe auf. Für noch kleinere Erhebungen jedoch ist eine direkte räumliche Beziehung nicht über einfache Lagebeziehungen nachweisbar. Es gibt aber durchaus Auswirkungen auf das Niederschlagsgeschehen (Barry, 1992). Der zugrunde liegende Prozessablauf kann wie folgt beschrieben werden: Im regionalen Druckfeld folgen die Luftmassen solchen Bahnen, die eine Minimierung der zu verrichtenden Arbeit im Gravitationsfeld der

Erde entsprechen. Sie strömen möglichst um das Hindernis herum. Ein Teil der Luft fließt dennoch über das Hindernis und wird somit nach oben gehoben. Die Lageänderung der Luftschichten setzt sich in der Höhe fort. Mit zunehmendem Abstand zur Erdoberfläche jedoch verringert sich der Betrag der Hebung, weil die Luft komprimiert wird. Gleichzeitig kommt es beim Überströmen von Gebirgen zu einer Rauigkeitszunahme und damit verbundener stärkerer horizontaler Windscherung, die wiederum eine vertikale Ausweichströmung anregt. Die höheren Vertikalgeschwindigkeiten rufen einen größeren Wasserdampffluss von Erdbodennähe in die freie Atmosphäre hervor und erhöhen damit die Kondensationsrate sowie den Wolkenwassergehalt in den Wolken (vgl. Bendix, 2004). Höhere vertikale Windgeschwindigkeiten können zusätzlich größere Wolkenelemente in der Schwebelage halten, die zu größeren Eiskristallen oder Wassertropfen anwachsen, bevor sie in die Verdunstungszone unter der Wolke fallen und auf der Erdoberfläche auftreffen. Zusammenfassend vergrößern kleine erzwungene Hebungsbeträge nicht die Wolkenmächtigkeit oder fixieren die Wolkenbildung an einem Ort durch Effekte wie Blockierungen oder Feeder-Seeder-Situationen. Sie erhöhen jedoch den Luftstrom durch die Wolke, wodurch mehr Wasserdampf in gleicher Zeit in Niederschlag umgesetzt werden kann. Durch die verstärkte geordnete Vertikalbewegung kann außerdem hinreichend Verdunstungsenergie freigesetzt werden, dass durch die abnehmende Stabilität der letzte benötigte Antrieb zur freien Konvektion geliefert wird. Die resultierenden Kräfte der aufgeführten Prozesskette sind in der Regel klein gegenüber denjenigen der Wasserdampfverfügbarkeit, der zyklonalen Hebungsvorgänge und der Thermik. Über klimatologische Zeiträume jedoch kann in Analogie zu ihrer dauerhaften Einwirkung erwartet werden, dass sie bei ausreichender Messdichte statistisch nachweisbar sind. Die Auswirkungen der erzwungenen Hebung können in anderen Gebieten erwartet werden, als direkt auf dem Luvhang der kleinen Erhebung, zum Beispiel verdriftet durch den Wind etwas weiter im Leebereich (vgl. Barry, 1992).

1.3 Urbane Niederschlagsbeeinflussung

Von urban geprägten Gebieten wird aufgrund des Unterschiedes zu Oberflächen mit Vegetations- und Wasserbedeckung ein spezifischer Einfluss auf die Atmosphäre ausgeübt. Städte werden bei bestimmten Fragestellungen als künstliche Orogene bezeichnet (Bornstein und LeRoy, 1990). Bei einem städtisch geprägten Raum handelt es sich zwar nicht um eine kompakte Vollform, aufgrund der hohen Oberflächenrauigkeit ist aber ein vergleichbares Anheben der atmosphärischen Grenzschicht festzustellen (Hupfer und Kuttler, 1998). Daraus ergeben sich unter anderem folgende Fragen:

- Kann eventuell daraus geschlossen werden, dass Städte, ähnlich wie orographische Erhebungen, die Niederschlagsverhältnisse beeinflussen?
- Und gibt es, analog der durch Howard (1833) erstmals festgehaltenen und vielfach bestätigten Zunahme der Temperatur innerhalb der Städte im Vergleich zum Umland (*UHI – urban heat island*) (Oke, 1990), auch typisch städtische Klimastrukturen bezüglich der Niederschlagsverhältnisse (*UIP – urban impact on precipitation*)?

Aus den Ergebnissen empirischer Untersuchungen konnten verschiedene Beeinflussungsszenarien durch städtische Räume abgeleitet werden. Es ergeben sich vier plausible Einflussfaktoren, über die urbane Niederschlagsmodifikation erfolgen kann (siehe Abbildung 1-1):

- erhöhte Energieumsetzung in Wärme,
- hohe Oberflächenrauigkeit,
- Ausstoß von Aerosolen und
- Veränderung des Wasserdampfgehaltes der Luft (Shafir und Alpert, 1990; Shepherd, 2005).



Abbildung 1-1: Übersicht über die Einflussfaktoren und die sich daraus ergebende urbane Modifikation der Niederschlagsbildung (eigene Zusammenstellung)

Der potentielle urban modifizierte Niederschlag (UIP) basiert auf einer Kombination dieser Einflussfaktoren, wobei der jeweilige Beitrag von den atmosphärischen Bedingungen, verschiedenen Eigenschaften der Städte und deren geographischer Lage abhängt. In mehreren bekannten Untersuchungen lag der besonderer Fokus auf der Verstärkung von Konvektionsniederschlägen und der daraus resultierenden positiven *urbanen Lee-Anomalie*, erstmals 1968 für La Porte (USA) ausgewiesen (Changnon Jr., 1968). Durch weitere empirische Untersuchungen wird die Hypothese der thermischen Verstärkung von Schauern belegt (Shepherd et al., 2002; Vogel und Huff, 1978). Wurden andersartige Verteilungen beobachtet, zum Beispiel im Winter, wurden diese nicht vertiefend analysiert (Changnon Jr. et al., 1991; Wang et al., 2009). Auch in den ersten dynamischen mesoskaligen Modellierungsansätzen wurden die Konvektionsniederschläge als Forschungsschwerpunkt übernommen, zum Teil wird die Analyse um die Reibungseffekte und eine Wirkung von Aerosolen ergänzt (Baik et al., 2001; Heever und Cotton, 2006; Molders und Olson, 2004; Shem und Shepherd, 2009; Shepherd; Pierce und Negri, 2002; Thielen et al., 2000).

1.4 Fragestellung und Motivation

Die Hauptbeweggründe für Stadtklimauntersuchungen resultieren entweder aus dem Interesse an der Feststellung der für eine Stadt spezifischen Verhältnisse oder aus dem Ziel, allgemeine Aussagen über das

Stadtklima im Zusammenspiel mit verschiedenen Lebensbereichen zu erhalten (Helbig, 1991: S. 258). Ausgehend davon, dass beide Aspekte für die Durchführung der meisten Forschungsvorhaben von großer Relevanz sind, ergeben sich für die Untersuchungen zum UIP folgende Fragestellungen und Beschränkungen.

Stadtklimatologische Fragestellung

Die vorliegende *Niederschlagsklimaanalyse-Berlin* hat zum Ziel, basierend auf experimentell empirischen Untersuchungen (siehe Kapitel 1.5), einen detaillierteren Blick auf die Niederschlagssituation der Stadt Berlin und seiner Umgebung zu richten und empirisches Wissen über die Art der Einflüsse von Städten auf die Niederschlagsverhältnisse zu entwickeln. Die Untersuchung der Niederschlagsverhältnisse muss vor dem Hintergrund unterschiedlicher Eigenschaften verschiedener Klimaelemente erfolgen, bei denen der Geofaktor Stadtoberfläche einen modifizierenden Einfluss auf die gemessenen Niederschlagsverhältnisse ausüben kann. Die Untersuchungen des Stadtklimas als Beispiel anthropogener Klimaveränderung soll dazu beitragen „[...] eine passende ‚Kontrolle‘ der Experimente, die diesbezüglich von Mensch und Natur durchgeführt werden zu entwickeln“ (Lowry, 1977: S. 129)¹.

Das gängigste Verfahren zur Feststellung lokaler klimatologischer Verhältnisse basiert auf langfristigen, räumlich repräsentativen Messungen, ergänzt durch kurzfristige Sondermessungen, die in Relation zu den festen Stationen interpretiert werden. Ein solches Vorgehen ist für das Klimaelement Niederschlag nur eingeschränkt möglich, da dieser nicht nur raumzeitlich stark variabel, sondern auch raumzeitlich begrenzt auftritt. Der Deutsche Wetterdienst hat aufgrund dieser Eigenschaften des Niederschlages zur Beantwortung allgemeiner hydrometeorologischer Fragen sein Klimamessnetz mit ehrenamtlichen Niederschlagsbeobachtern verdichtet. Für diese Arbeit werden außerdem alle verfügbaren Angaben zu Niederschlagsmengen aus anderen Quellen hinzugezogen. Somit steht ein umfangreicher Datensatz täglicher Niederschlagssummen zur Verfügung, der in Kapitel 3.1 genauer beschrieben wird.

Praxisbezogene Motivation

Die angestrebten Aussagen über das Stadtklima als Umfeld des Menschen konzentrieren sich bei empirischen stadtklimatologischen Untersuchungen insbesondere auf die Klimaelemente, die stark von menschlichen Aktivitäten beeinflusst werden und stark auf das Leben der Menschen rückwirken können. Die prominenteste Größe ist die Lufttemperatur, für die im langjährigen Mittel das Phänomen der innerstädtischen Wärmeinsel beobachtet wird. Die Ausbildung der Wärmeinsel resultiert aus dem Einfluss, den der städtische Baukörper auf den Strahlungs- und Wärmehaushalt ausübt. Die zusätzliche Wärme in den Städten kann erheblichen Einfluss auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Einwohner nehmen (Gabriel, 2009). Im stadtklimatologischen Kontext werden weiterhin verschiedene Aspekte der Luftqualität analy-

¹ “More specifically, the problem is one of devising a suitable “control” in the series of experiments being conducted by Man and Nature.”

siert. Luftbelastungssituationen sind unter anderem durch menschliches Handeln stark geprägt und im Gegenzug können diese die Gesundheit vieler Stadtbewohner beeinträchtigen (Bruckmann und Eikmann, 2007; Kampa und Castanas, 2008).

Niederschlagsbezogenen Fragestellungen ergeben sich für den Menschen und sein Handeln aus Gefährdungen

- durch Hochwässer der Fließgewässer,
- durch lokale Überflutungen mit Überlastung der Abwasserkanalisation,
- durch lang anhaltende Trockenheit und
- durch Einschränkungen der Wasserversorgung.

Es wird angestrebt, mit dieser Arbeit die Grundlagen zu verbessern, auf deren Basis die Relevanz der urban induzierten Veränderungen des Niederschlages im Zusammenhang mit den oben genannten Problemstellungen geprüft werden kann.

Konzeptionelle und inhaltliche Bezüge zu Modellen

Durch den Charakter der vorliegenden Arbeit können Bezüge zu mesoskaligen Klimamodellen, hydrologischen sowie ökologischen Modellen hergestellt werden. Die Ergebnisse der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin können als mögliche Referenzdaten zur Parametrisierung von mesoskaligen Klimamodellen verwendet werden. Über eine verbesserte Implementierung der spezifischen Einflüsse von Städten auf das Niederschlagsgeschehen können zum Beispiel die aus dem globalen anthropogenen Klimawandel resultierenden Veränderungen im urbanen Lebensraum besser abgeschätzt werden. Die Resultate der Arbeit können auch für die Verifizierung von Modellierungsergebnisse über mittlere klimatologische Zustände Anwendung finden.

Der entstandene konsistente Datensatz mit hoher raumzeitlicher Auflösung bietet gute Voraussetzung als Eingangswerte in hydrologischen oder ökologischen Modellen. Genauest mögliche regionalisierte Angaben sind notwendig, um oben genannte hydrologische Gefahrensituationen abschätzen zu können, aber sie werden auch zum Beispiel für die Berechnungen zur Grundwasserneubildung oder für Nährstoffeinträge in Gewässer benötigt. Der Klimaparameter Niederschlag ist neben der Globalstrahlung und der Temperatur ein wichtiger Parameter für das Wachstum von Pflanzen, so dass er zum Beispiel in der Modellierung von potentiellen Ausbreitungsgebieten von verschiedenen Pflanzenarten benötigt wird.

1.5 Untersuchungskonzept

In seinem Review-Artikel zum Status der stadtklimatologischen Forschung im Bereich Niederschlag merkt Lowry (1998: S. 507) provozierend an, dass „die aktuelle Entwicklung in der Stadtklimatologie den Trend ‚mehr aber nicht besser‘ nimmt - mehr Jahre, mehr Stationen, aufwendigere Messungen, mehr

Einflussvariablen, komplexere Auswertungsmethoden²“. Dieser Entwicklung entzieht sich diese Arbeit aus verschiedenen Gründen nicht. Es werden der aus Sicht der Datenverfügbarkeit längstmögliche Zeitraum sowie alle verfügbaren Stationen genutzt, um einen klimatologisch notwendigen Zeitraum zu überdecken. Es werden die verfügbaren technischen Möglichkeiten für die Datenverarbeitung verwendet, um eine automatisierte Auswertung der großen Datenmengen zu erreichen. Als Einfluss- und Erklärungsparameter werden neben der Stadtoberfläche verschiedene atmosphärische Variablen herangezogen und kombiniert. Mit diesem Vorgehen wird eine ausführliche Analyse am Fallbeispiel Berlin so strukturiert und durchgeführt, dass sie als Vorlage für die konzeptionelle und methodische Übertragung auf weitere Großstädte geeignet ist.

Ein weiterer Einwand von Lowry ist, dass die von Atkinson 1968 aufgestellte These, „das Problem liegt eher darin den Stadteffekt zu beweisen als ihn zu erklären³“ immer noch gilt. Für zukünftige Niederschlagsuntersuchungen empfiehlt er, Experimente zu entwerfen und an mehreren Städten mit ähnlichen Rahmenbedingungen nachzuprüfen. Dabei sollte einerseits versucht werden, den Stadteffekt zu generalisieren, andererseits jede Stadt als einzigartig anzuerkennen. Der Review-Artikel von Shepherd (2005: S. 20) stimmt mit der Aussage von Lowry überein, dass sich die Fragestellung in der Stadtklimatologie bezogen auf die Niederschläge von „Gibt es eine Veränderung und wo?“ zu „Wie und warum verändert die Stadt die Niederschlagshöhe?“ verschoben hat. Zur Bearbeitung dieses Fragenkomplexes regt er die Durchführung numerischer Modellierungen an. Damit könnte man eine Art wiederholbares Experiment generieren um zu überprüfen, ob die bisherigen Erkenntnisse bereits ausreichen, um die Verhältnisse in und um Städten wiedergeben zu können.

Dem Konzept der durchzuführenden Datenanalyse liegt das Prinzip eines experimentbasierten Untersuchungsprogramms für stadtklimatologische Niederschlagsanalysen zugrunde. Die Auswertung der gemessenen Niederschlagsdaten einer Niederschlagsklimaanalyse soll methodisch weitgehend der Ausführung von Experimenten entsprechen. Dafür wird der umfangreiche Niederschlagsdatensatz (siehe Karte 2-4) durch verschiedene Experimentkonfigurationen systematisiert. Diese Konfigurationen entsprechen als nachträgliche Klassifizierung festgelegten Randbedingungen geplanter Experimente. Ein in diesem Sinne formuliertes Experiment ist nicht zu verwechseln mit Untersuchungsanordnungen, die durch gezielt eingerichtete Sondermessnetze, wie bei dem Metropolitan Meteorological Experiment (METROMEX) von 1971 bis 1976 in St. Louis (USA) (METROMEX, 1977), realisiert werden.

Die Basishypothesen für die Experimente lauten:

² “the general trend in methodology might be characterised as ‘more but not better’. More cities have been studied, longer periods of record have been analysed, ...”

³ “The problem is as much to prove the influence of towns as to explain it.”

- Die Stadtoberfläche unterscheidet sich so deutlich von nicht bebauter Fläche, dass sie einen systematischen Einfluss auf die Niederschlagsbildung ausübt, der über einen klimatologischen Zeitraum wiederholt feststellbar ist und gesichert zu den sonst existierenden Verhältnissen abgegrenzt werden kann.
- Verschiedene Ausprägungen atmosphärischer Zustände, als unabhängige Variablen, lassen differenzierte räumliche Muster der abhängigen Variablen, des Niederschlags, entstehen und geben dabei einen Einblick in die Wirksamkeit von Stadtoberflächen.

Das daraus resultierende Experimentdesign weist die Niederschlagsverteilung als die abhängige Variable aus, die es zu untersuchen gilt. Der feste Einflussfaktor, dessen Auswirkungen auf die Niederschlagsverteilung hauptsächlich von Interesse ist, ist die Stadtoberfläche. Der erklärende Faktor, der variieren kann und verschiedene Ausprägungen annehmen kann, ist die Atmosphäre mit ihren Parametern. Es entsteht ein faktorielles Experiment, in dem ein bis drei Faktoren der atmosphärischen Eigenschaften manipuliert werden (siehe Abbildung 1-2).

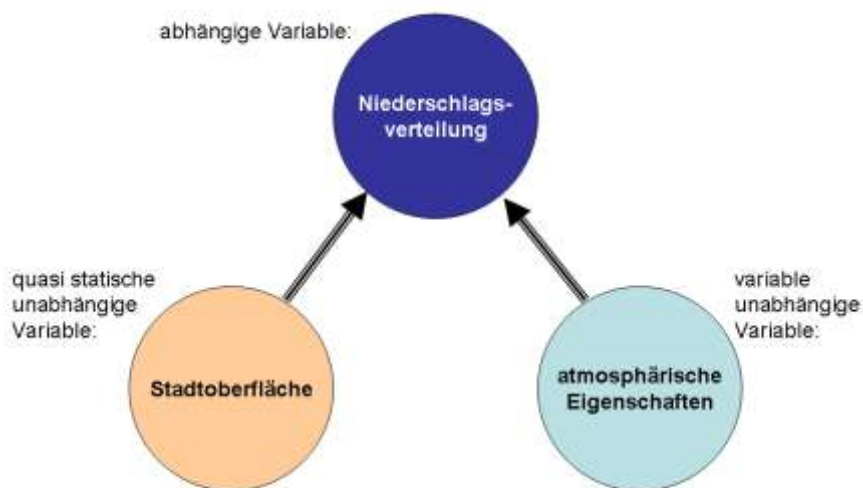


Abbildung 1-2: Schema des Experimentdesigns zur Untersuchung der urban geprägten Niederschlagsverteilung unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen

Das Prinzip der Experimente beruht darauf, den umfangreichen Datensatz in Teildatensätze mit vergleichbaren Grundvoraussetzungen aufzuteilen. Die atmosphärischen Eckdaten repräsentieren Experimentkonfigurationen und die Teildatensätze entsprechen den Messergebnissen. Zur Festlegung der atmosphärischen Grundvoraussetzungen sieht das experimentelle Konzept vor, dass die Daten nach einer Variablen oder Variablenkombination geordnet und extrahiert werden. Die nicht festlegbaren Randbedingungen sind jedoch die Herausforderung der „quasi Feldexperimente“. Sie können nicht sicher konstant gehalten bzw. nicht genau festgestellt werden. Damit eine Interpretation dennoch möglich ist, wird ent-

sprechend der Ceteris-paribus-Klausel ausgegangen, dass ansonsten gleiche Bedingungen herrschen. Darunter fällt:

- dass die Messstandorteigenschaften im Untersuchungsgebiet weitgehend unverändert sind,
- das Relief konstant ist,
- prozessrelevante Landnutzungsänderungen erfolgen während des Untersuchungszeitraum nur in geringem Umfang,
- insbesondere der Stadtcharakter ändert sich im Untersuchungszeitraum nicht signifikant.

Es wird auch davon ausgegangen:

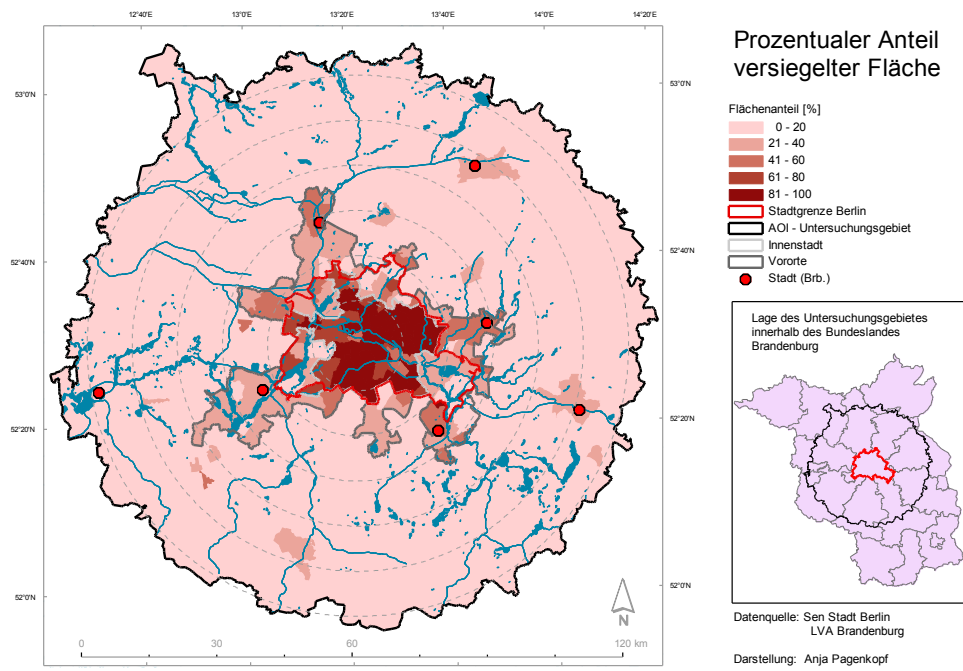
- dass die betrachteten Atmosphärenvorgänge über den Untersuchungszeitraum vergleichbar ablaufen,
- die allgemeine atmosphärische Dynamik sowie die Niederschlagsbildungsprozesse gleich bleiben
- und die Eigenschaften der hemisphärischen Zirkulation und der beteiligten Luftmassen erhalten bleiben.

Eine mögliche zeitliche Änderung der Häufigkeit bestimmter Ausprägungen atmosphärischer Faktoren muss nicht berücksichtigt werden, weil kein Zeitbezug in der Auswertung hergestellt wird. Es werden somit Niederschlagsstrukturen für bekannte meteorologische Konfigurationen räumlich interpretiert und verglichen, bei denen städtische Einflussfaktoren unterschiedlich stark ins Gewicht fallen können. Auf diesem Weg kommt man einer differenzierteren Betrachtung der Frage näher, in wie weit die bisher angeführten Einflusspfade städtischer Oberflächen realistisch nachvollziehbar sind. Das heißt nicht nur den theoretischen Prozess und das Endergebnis zu dokumentieren, sondern auch die Situationen aufzuzeigen, bei denen einzelne Faktoren überwiegen. Der für diese Arbeit zur Verfügung stehende Datensatz von Tagessummen in Berlin und Brandenburg lässt dabei eine zeitlich ereignisgenaue Betrachtung nicht zu, jedoch wird räumlich der hohen Variabilität des Niederschlags mit der beträchtlichen Stationszahl Rechnung getragen.

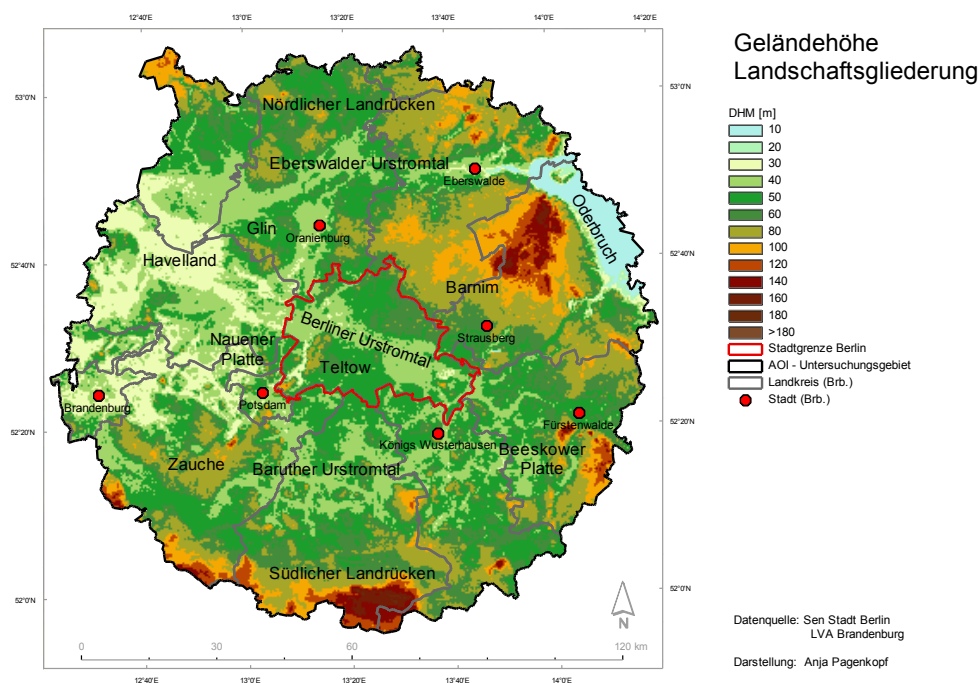
2 Untersuchungsgebiet

Diese Fallstudie wird für die Stadt Berlin durchgeführt. Berlin befindet sich im Nordosten Deutschlands und ist vollständig von dem Bundesland Brandenburg umgeben. Die Ausdehnung Berlins hat sich nach den umfangreichen Eingemeindungen zu Großberlin 1920 infolge seiner vierzigjährigen Teilung, verbunden mit der spezifischen Hauptstadtpolitik der DDR, nicht mehr verändert. Es existiert nur ein vergleichsweise schmaler suburbaner Saum, in dem sich die Brandenburger Städte Potsdam, Königs Wusterhausen, Strausberg, Bernau und Oranienburg befinden. Der zusammenhängende Bereich des engeren Verflechtungsraums mit einem Anteil von mehr als 20 Prozent bebauter Fläche in den Gemeinden, nach der Klassifizierung für CORINE Landcover, erstreckt sich insgesamt über etwa 1.800 Quadratkilometer (siehe Karte 2-1). In diesem urbanen Raum lebten im Jahr 2000 zirka 4,5 Mio. Menschen. Es gibt nur eine weitere Stadt mit mehr als 100.000 Einwohnern innerhalb Brandenburgs – Cottbus in einer Entfernung von 90 km. Berlin bildet somit eine große, singuläre, urbane Agglomeration innerhalb eines land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebietes. Die primäre Hypothese der Untersuchung ist, dass die bebaute Fläche groß genug ist, um einen feststellbaren Stadteffekt auf die räumliche Verteilung des Niederschlags hervorzurufen. Für den fallenden Niederschlag gibt es keine autochthonen Wetterlagen vergleichbar den Strahlungstagen und Strahlungsnächten für die Temperatur, in denen die lokalen Eigenschaften direkt den Atmosphärenzustand bestimmen. Zum Aufspüren von Auswirkungen eines Stadtkörpers auf das Niederschlagsgeschehen muss infolgedessen das rurale Umland als potentieller Einflussbereich mit berücksichtigt werden. In dem zu betrachtenden Gebiet müssen dem entsprechend den Grundannahmen nach Lowry (1977) Flächen mit urbanem Lokalklima und mit urban beeinflusstem Lokalklima und in gewissem Umfang Regionalklima enthalten sein. Bisherige stadtklimatologische Untersuchungen der Niederschlagsverhältnisse Berlins sind nur geringfügig über die Stadtgrenzen hinaus ausgedehnt worden (Graf, 1979: S. vgl. ; Malberg und Frattesi, 1990; Schlaak, 1977).

Für die vorliegende Arbeit wurde ein Gebiet mit dem dreifachen Radius des Stadtgebietes als Untersuchungsgebiet festgelegt. Die Größe des Untersuchungsgebietes fußt auf einer praktischen und einer theoretischen Überlegung. Praktisch liegt hinter diesem Radius in östlicher Richtung die Grenze zu Polen, was die Datenverfügbarkeit stark erschwert. Theoretisch ergibt sich aus den bisher veröffentlichten Angaben zur Entfernung des Bereiches mit urban modifizierten Niederschlagshöhen in Abhängigkeit von der Stadtausdehnung eine Spanne von 25 km bis 70 km (vgl. Kohl, 1969; METROMEX, 1977; Shepherd; Pierce und Negri, 2002). Unter der Annahme, dass das Gebiet des urban beeinflussten Lokalklimas und die Stadtgröße in einer gegenseitig entsprechenden Skala rangieren, das heißt auf einer Fläche von mehreren hundert Quadratkilometern (vgl. Böhm, 1979; Kaufmann et al., 2007), müsste der UIP innerhalb des Untersuchungsgebietes wirksam werden und mit der verfügbaren Dichte des Stationsnetzes nachgewiesen werden können (siehe Karte 2-4).



Karte 2-1: Prozentualer Anteil versiegelter Flächen, CLC Klassen 11, 121, 122 und 123) an den Teilgebieten im Untersuchungsgebiet (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) im Jahr 2000 (eigene Darstellung basierend auf den Daten von CORINE2000)



Karte 2-2: Relief und Landschaftsgliederung im Untersuchungsgebiet (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) (eigene Darstellung basierend auf den Daten des DEM90m der SRTM)

Berlin befindet sich im eiszeitlich geformten Norddeutschen Tiefland. Ein reliefbedingtes Regionalklima kann trotz der geringen Höhenunterschiede erwartet werden (Hendl, 1969) und muss in der Auswertung berücksichtigt werden. Die Geländehöhe im Untersuchungsgebiet reicht von 18 m NN im Oderbruch über 34 m NN im Berliner Urstromtal bis zu 140 m NN auf der Grundmoränenplatte des Barnim und 220 m NN im Fläming, einer Endmoränenstruktur (siehe Karte 2-2).

Bestimmend für die Niederschlagssituation Berlins ist die Lage im Übergangsbereich von maritimem zu kontinentalerem Klima der Westwinddrift. Es gibt ganzjährig zyklonale Niederschlagsgenese (Fraedrich et al., 1986; Hendl, 1995). Im Jahresgang zeigt sich ein Herbst-Winter Sekundärmaximum der Niederschlagshöhe, so auch im maritim geprägten Hamburg, das aber geringer ausfällt als das Sommermaximum der Niederschlagshöhe, das zum Beispiel vergleichbar ist mit dem des kontinentaler geprägten Prag (Tschechische Republik) (siehe Abbildung 2-1). Schauerereignisse, die nicht an Frontaktivität gebunden sind, überwiegen im Frühjahr und Sommer, wenn kühle Atlantikluft über das von der hoch stehenden Sonne aufgeheizte Land strömt.

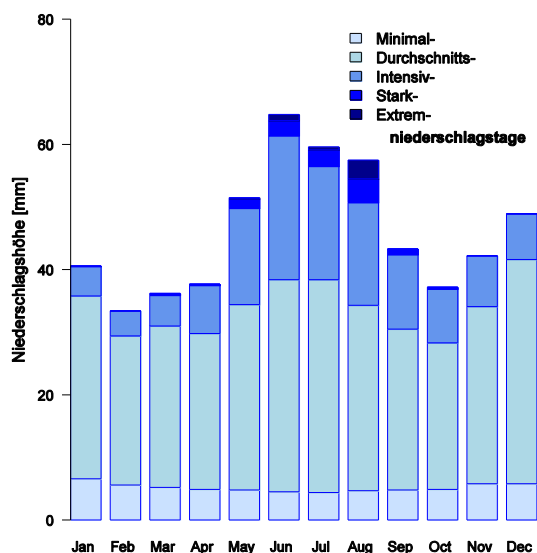


Abbildung 2-1: Jahresgang der Niederschlagshöhe berechnet aus den mittleren monatlichen Gebietsniederschlagshöhen des Untersuchungsgebietes, Berlin und Umgebung im Umkreis von 40 Kilometern, für den Zeitraum von 1951 bis 2000 (Klasseneinteilung siehe Kap. 3.2.1)

Für die kartographische Darstellung der Ergebnisse wurde eine konzentrische Form gewählt, um eine symmetrische von der Stadt ausgehende Betrachtung zu erleichtern und richtungsvariable Analysen durchführen zu können. Diese Form der Ergebnispräsentation wurde ebenfalls bei METROMEX angewendet. Der Kreismittelpunkt befindet sich auf dem Alexanderplatz, mit den Koordinaten 13,42° östlicher Länge und 52,52° nördlicher Breite. Der Alexanderplatz entspricht ungefähr dem berechneten zentralen Punkt der Fläche innerhalb der Stadtgrenze.

Das Untersuchungsgebiet kann gut in vier charakteristische Ringe mit unterschiedlichem Urbanitätsgrad (Bebauungszonen) gegliedert werden (siehe Karte 2-1):

- Die Kreisfläche mit einem 10 Kilometer Radius um den Mittelpunkt entspricht dem dicht bebauten Innenstadtgebiet (>60 Prozent bebaute Fläche $\sim 650 \text{ km}^2$) und umfasst damit in etwa die Stadtfläche innerhalb des S-Bahn Rings.
- Der Ring über die nächsten 10 Kilometer modelliert den Stadtrand (20 – 60 Prozent bebaute Fläche $\sim 900 \text{ km}^2$) und ist vergleichbar mit dem Gebiet bis zur administrativen Stadtgrenze.
- Der Ring zwischen 20 und 30 Kilometern kommt dem Vorortring gleich (>20 Prozent bebaute Fläche $\sim 1.800 \text{ km}^2$), der ungefähr innerhalb des Autobahn rings liegt.
- Das rurale Umland von Berlin, weist weniger als 20 Prozent bebaute Fläche an den Gemeindeflächen auf und liegt in einem Ring von 30 bis 60 Kilometer Entfernung zum Mittelpunkt ($\sim 12.500 \text{ km}^2$).

Das Untersuchungsgebiet bildet damit eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von 120 Kilometern zwischen Elbe und Oder sowie Nördlichem und Südlichem Landrücken. Es liegt innerhalb eines Interpolationsgebietes, das sich zwischen 12° und 15° östlicher Länge sowie $51,5^\circ$ und $53,5^\circ$ nördlicher Breite erstreckt. Interpretationsprobleme durch Randeffekte werden durch das aus dem Interpolationsgebiet ausgeschnittene Untersuchungsgebiet weitgehend ausgeschlossen. Weil nur eine Annäherung an die wirklichkeitsnahe Niederschlagsstruktur aus den Messwerten erfolgen kann, werden für eine leichtere Handhabung und um Artefakte zu vermeiden die Interpolationsergebnisse als Gebietsmittelwerte für Teilflächen ausgegeben. Die 636 Teilgebiete entsprechen den kleinstmöglichen administrativen Einheiten im Untersuchungsgebiet, den Stadtteilen in Berlin und den Gemeinden im Land Brandenburg (siehe Karte 2-3). Das Größenspektrum der Teilgebiete erstreckt sich von 2 km^2 bis 340 km^2 , wobei die mittlere Fläche 20 km^2 entspricht. Das 95 Perzentil der Gebietsgröße beträgt 52 km^2 .

Die inhaltlich visuelle Interpretation dieser Kartendarstellung bedarf einer Umstellung von der Sehgewohnheit für die Darstellungen von Niederschlagsfeldern mit Isohyeten zu mittleren Niederschlagshöhen für Gebiete mit amtlicher Grenzziehung. Die räumliche Interpolation nicht in quadratische Raster durchzuführen, sondern als kleinste Elemente administrative Gebiete zu verwenden, hat den Vorteil einer eindeutigen und anschaulichen Adressierbarkeit der Ergebnisse. Nachteilig ist, dass in Einzelfällen die strukturierten Grenzen der Teilgebiete eine Genauigkeit für die Niederschlagsverteilung suggerieren, die nicht sachlich ist. Die Flächendarstellung verhindert allerdings die subjektive Isolinienziehung, die zu Fehlinterpretationen führen kann, wie sie Lowry (1998: S. 502) verdeutlicht hat. Eine punktuelle Signaturdarstellung wie zum Beispiel bei Schlünzen (2009) vermittelt dagegen sehr vage die räumlichen Strukturen der Niederschlagshöhe.

Im Vergleich mit anderen Niederschlagskarten ist zu beachten, dass durch die Interpolation und Mittelwertbildung die Beträge der angegebenen Gebietsniederschlagshöhen niedriger sind als die originalen

punktuellen Messwerte. Es wird nicht mehr die Höhe der Wassersäule an einen Punkt angegeben, sondern die mittlere Höhe der Wasserdecke über einem größeren Gebiet (siehe. Karte 3-1). Zusätzlich reduziert sich die kleinräumige Varianz und erleichtert so die Erfassung räumlicher Strukturen in der Mesoskala. Die Größenordnung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme der Jahre 1951 bis 2000 im Untersuchungsgebiet liegt an den Stationen zwischen rund 500 mm und 640 mm und in den Teilgebieten zwischen 530 mm und 600 mm. Zur Veranschaulichung sind der Tabelle 2-1 die mittleren Jahressummen für drei Stationen und die umschließenden Teilgebiete aufgeführt.

Die räumliche charakteristische Anordnung der mittleren Jahressummen für die Jahre 1951 bis 2000 in Karte 2-5⁴ zeigt ein dominantes Niederschlagsmaximum am Westhang des Barnims sowie Maxima im Bereich des Grunewalds, auf dem Teltow und dem Glin. Diese Verteilung stimmt innerhalb der Stadtgrenze in den Grundzügen mit den bisherigen Kartendarstellungen der Niederschlagsverhältnisse in Berlin von Schlaak (1972) in Karte 2-6 überein. An der Ostgrenze Berlins nimmt die Niederschlagshöhe in der Abbildung von Schlaak ab, vermutlich durch die für ihn eingeschränkte Datenverfügbarkeit außerhalb der Stadt. Innerhalb des Stadtgebietes erstreckt sich ein Bereich geringerer Niederschlagshöhen vom Zentrum in Richtung Süden, etwa parallel zum Verlauf des Berliner Urstromtals. Im Oderbruch sowie im Havelland fällt ebenfalls weniger Niederschlag.

Tabelle 2-1: Vergleich der gemessenen mittleren Jahressummen an drei meteorologischen Hauptstationen des DWD und des die Station einschließenden Gebietsniederschlags (1951-2000)

| Station | mittl. Jahressumme [mm] | mittl. Gebietsniederschlag [mm] |
|----------------|--------------------------------|--|
| Potsdam | 590 | 554 |
| Tempelhof | 580 | 541 |
| Lindenberg | 556 | 550 |

Für die Erstellung der Niederschlagskarten stehen für das Berliner Stadtgebiet Messwerte eines aus mehreren Quellen zusammengetragenen Niederschlagsdatensatzes⁵ und für das weitere Interpolationsgebiet Messwerte der Stationen des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung. Die Stationen sind bezüglich der prozentualen Stationsverfügbarkeit klassifiziert, die Auskunft darüber gibt, für wie viele Niederschlagstage Messwerte an der Station vorhanden sind (siehe Tabelle 2-2). Für eine qualifizierte Interpretation der in dieser Arbeit enthaltenen Karten der Niederschlagsverteilung sind in der Tabelle 2-3 die DWD Messstationen mit 100 Prozent Datenverfügbarkeit aufgeführt, die mögliche Strukturen in den verschiedenen Teilbereichen des Untersuchungsgebietes maßgeblich stützen. Durch das Spezifikum des Niederschlagsdatensatzes basiert die Niederschlagsstruktur im Westen Berlins auf den Daten von zirka 72 Stationen,

⁴ Die Erläuterung des Kartenaufbaus befindet in der Einleitung des Kapitels 4.

⁵ Der Datensatz wird in Kapitel 3.1 detailliert vorgestellt.

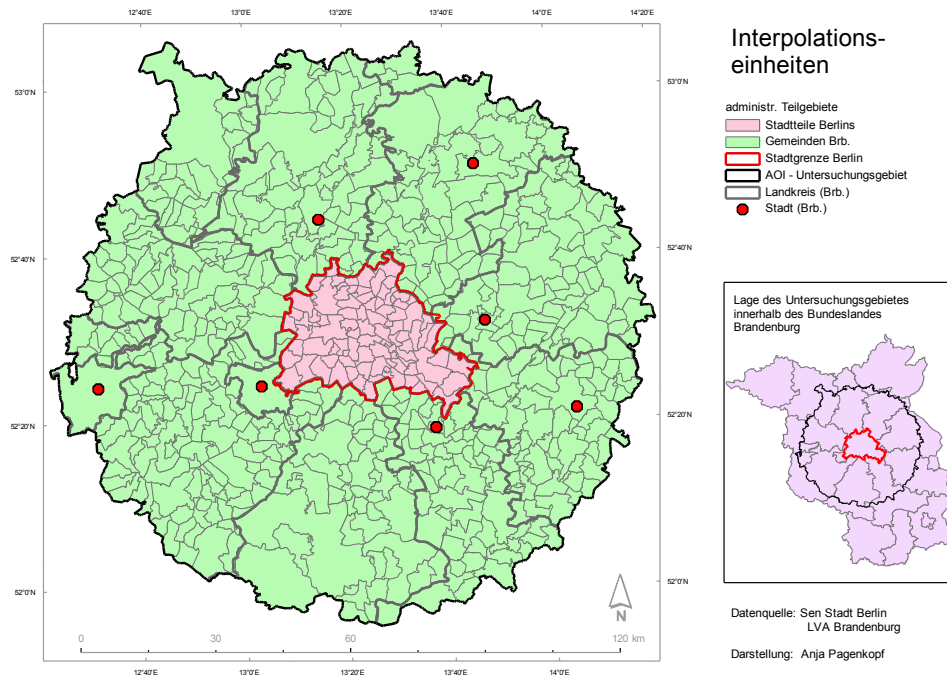
durch die jeweils mindestens 60 Prozent der Tage mit Niederschlag erfasst wurden. Im Osten Berlins konnten für 30 Stationen nur Teildatensätze ermittelt werden, für die Messwerte von weniger als 30 Prozent der Regentage vorliegen. In der Karte 2-4 ist die Verteilung der einbezogenen Niederschlagsstationen dargestellt.

Tabelle 2-2: Anzahl der Stationen klassifiziert nach der Datenverfügbarkeit bezogen auf alle Niederschlagstage im Untersuchungszeitraum 1951-2000

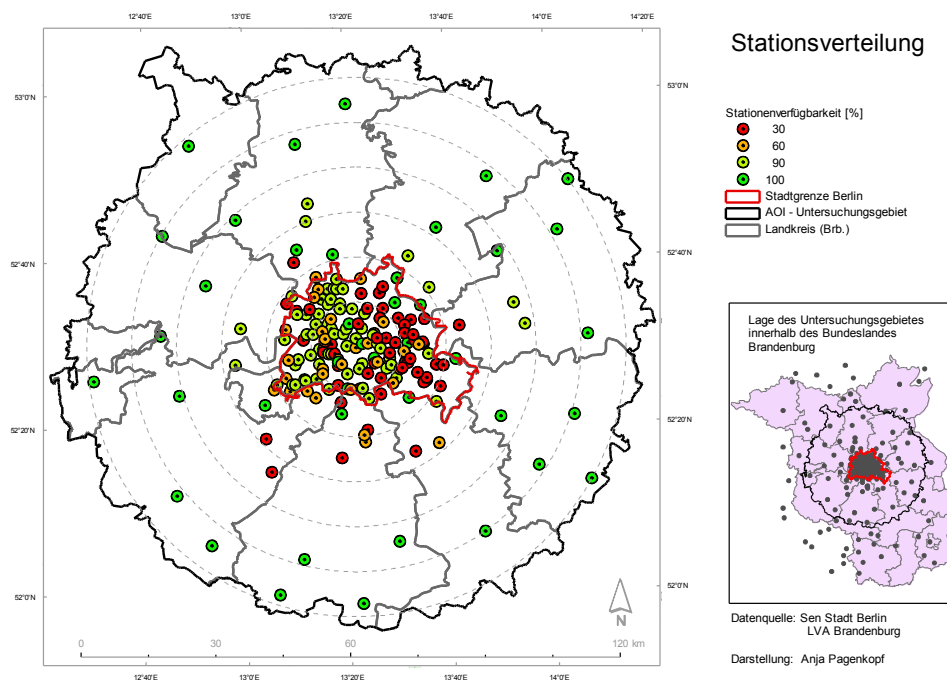
| Datenverfügbarkeit | $\leq 30 \%$ | $\leq 60 \%$ | $\leq 90 \%$ | $\leq 100 \%$ |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Stationsanzahl | 56 | 32 | 67 | 93 |

Tabelle 2-3: Übersicht über Stützstationen für räumliche Strukturen der interpolierten Niederschlagsverteilung nach den Himmelsrichtungen

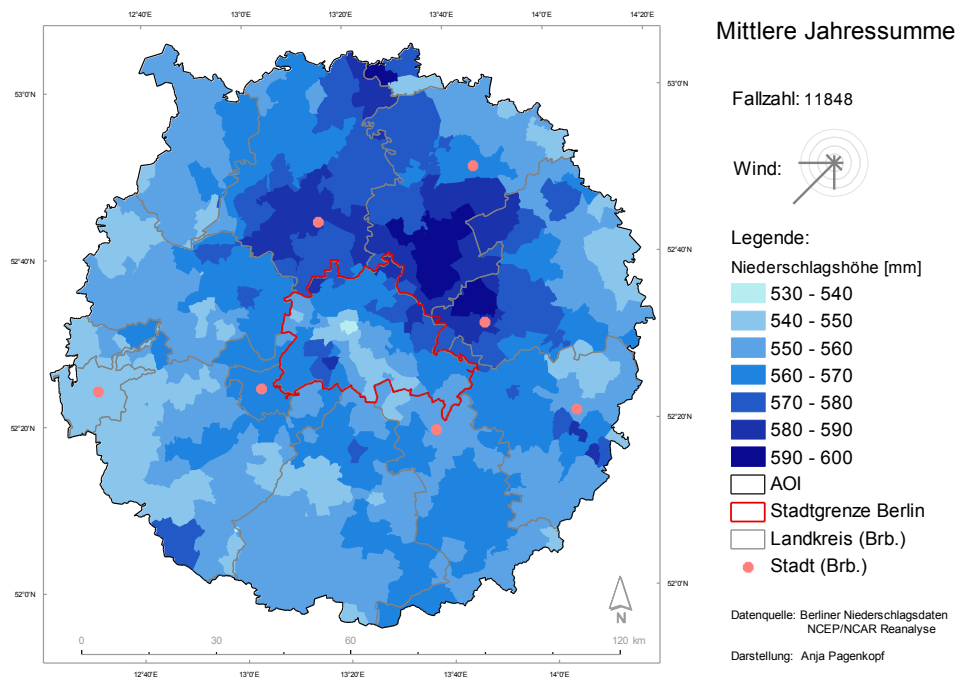
| | | |
|--|---|---|
| Nordwesten <i>Station an der Stadtgrenze:</i> Eiskeller <i>Stationen im nahen Umland:</i> Velten, Kremmen | Norden <i>Station an der Stadtgrenze:</i> Hohen Neuendorf <i>Stationen im nahen Umland:</i> Oranienburg, Löwenberg | Nordost <i>Stationen an der Stadtgrenze:</i> Berlin-Malchow, Buch, Schönnow, Blumberg <i>Stationen im nahen Umland:</i> Tiefensee, Rüdersdorf |
| Westen <i>Station an der Stadtgrenze:</i> nicht vorhanden <i>Stationen im nahen Umland:</i> Priort, Päwesin, Nauen | Berlin <i>Stationen in der Stadt:</i> Tegel, Tempelhof, Dahlem, Alexanderplatz | Osten <i>Stationen an der Stadtgrenze:</i> Schöneiche, Dammheide <i>Stationen im nahen Umland:</i> Strausberg, Rehfelde, Müncheberg |
| Südwesten <i>Station an der Stadtgrenze:</i> Potsdam <i>Stationen im nahen Umland:</i> Marquard, Brück, Groß Kreutz | Süden <i>Stationen an der Stadtgrenze:</i> Lichterfelde, Teltow <i>Stationen im nahen Umland:</i> Kemnitz, Luckenwalde | Südosten <i>Stationen an der Stadtgrenze:</i> Schönefeld, Schmöckwitz <i>Stationen im nahen Umland:</i> Hartmannsdorf, Fürstenwalde, Storkow, Märkisch Buchholz |



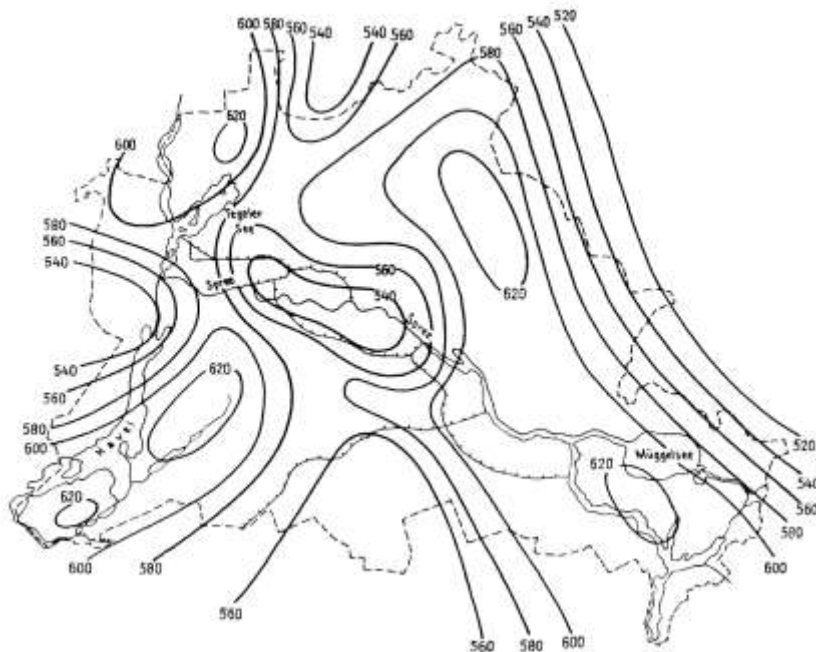
Karte 2-3: Einteilung des Untersuchungsgebietes (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) in kleinste administrative Teilgebiete für die Niederschlagsinterpolation



Karte 2-4: Verteilung der Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) und im Interpolationsgebiet (kleine Karte)



Karte 2-5: Räumliche Verteilung der mittleren Jahressumme in Berlin und den angrenzenden Gebieten Brandenburgs für den Zeitraum 1951-2000



Karte 2-6: Angenäherte langjährige mittlere Niederschlagsverteilung in Berlin nach den Reihen 1891-1930, 1901-1950 und 1960-69 (Quelle: Schlaak, 1972)

3 Daten und Methoden

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Eigenschaften des in dieser Arbeit verwendeten Niederschlagsdatensatzes beschrieben und die Aufbereitungsschritte vorgestellt. Im zweiten Teil werden die zur Erklärung herangezogenen Datensätze der atmosphärischen Parameter und ihre Vorbereitung dargestellt. Anschließend wird die Auswertungsmethodik erläutert.

Der fallende Niederschlag ist einerseits die erste meteorologische Größe, die von den Menschen gemessen werden konnte, bleibt jedoch andererseits bis heute das am schwierigsten exakt zu erfassende Klimaelement. Die Einfachheit der Messung basiert auf dem Auffangen in Gefäßen und dem Vergleichen der Mengen. Die Schwierigkeit beruht in der vergleichsweise geringen Belastbarkeit der Punktmessung als repräsentativem Wert für ein größeres Gebiet. In Städten ist die Aufstellung von Niederschlagssammlern besonders diffizil, da kaum vergleichbar freie Flächen wie im Umland verfügbar sind und diese wiederum nicht sehr repräsentativ für die Stadt wären.

3.1 Berliner Niederschlagsdatensatz

Klimatologische Messungen sollten über einen möglichst langen, aber mindestens aussagekräftigen Zeitraum mit konstanten messtechnischen Rahmenbedingungen durchgeführt werden. An den beiden meteorologischen Observatorien im Untersuchungsgebiet – Potsdam und Lindenberg – sind diese Anforderungen über einen Zeitraum von 100 Jahren bestmöglich umgesetzt. Die synoptischen Wetterstationen des Wetterdienstes erfassen die Eigenschaften der Atmosphäre vorrangig für den Zweck der Wettervorhersage. Zusätzlich gibt es das Bestreben, die Daten auch im Sinne einer günstigen klimatologischen Auswertbarkeit aufzunehmen. Doch bei den Wetterstationen spielen oft praktische und finanzielle Erwägungen bezüglich der Unterhaltung, der Verlegung bis hin zur Aufgabe des Standortes eine gewichtige Rolle. Über den Untersuchungszeitraum von 1951 bis zum Jahr 2000 kam es zu einigen Verlegungen von Stationen im Untersuchungsgebiet, z.B. der Station Flughafen Tempelhof vom Norden des Flugfeldes an den südlichen Rand. Da eine Wetterstation repräsentativ für ein größeres Gebiet eingerichtet wird, wurde bei einer Verlegung um kurze Distanzen die Besonderheit des jeweiligen Standortes als Fehlerrauschen im Datensatz aufgefasst. Verschiedene Wetterstationen, z.B. Berlin Ostkreuz, wurden aufgegeben oder es wurden Wetterstationen neu eingerichtet, z.B. Berlin Alexanderplatz. Der Standort Alexanderplatz wurde außerdem schnell in eine automatische Station ohne Wetterbeobachter umgewandelt. Besonders konvektive Niederschlagsstrukturen können so kleinräumig sein, dass sie mit dem vorhandenen Netz nicht ausreichend beschrieben werden können. Darum gibt es nach wie vor ehrenamtlich betriebene Messstationen für die genauere Erfassung des in Wasserhaushaltsberechnungen der Flusseinzugsgebiete eingehenden Niederschlags. An diesen Standorten werden nur die Tagessummen des Niederschlags erfasst.

Im Berliner Stadtgebiet werden durch weitere Einrichtungen und Institutionen Niederschlagshöhen für ihre speziellen Zwecke erfasst. Die Berliner Wasserbetriebe (BWB) messen mit Regenschreibern die Niederschlagsintensität mit dem Ziel, die Abwasserpumpen der Mischkanalisation entsprechend der zu er-

wartenden Niederschlagsmenge aus dem Einzugsgebiet einstellen zu können. Die Tagessummen werden dann in den Betriebstagebüchern vermerkt. Die Regensammler der BWB sind im Gegensatz zu der Vorgabe der WMO an vielen Abwasserpumpwerken jedoch in zwei Meter Höhe über dem Erdboden eingerichtet. Die Berliner Forsten brauchen einen Einblick in die Wasserversorgung der Bäume auf den sandigen Böden. Dabei ist es nicht so wichtig, die Niederschlagsmenge für jeden Tag genau zu differenzieren, so dass mehrfach die Niederschläge des gesamten Wochenendes erst am Montag bestimmt wurden. Solche Sammelmessungen wurden für die Analyse aus den Reihen eliminiert. Es gibt außerdem mehrere wetter- und klimainteressierte Privatpersonen, die freiwillig jeden Tag ihren Regensammler um 07:00 MEZ auslesen. Die Messwerte all dieser Quellen wurden von Dipl.-Met. Paul Schlaak zusammengetragen und von Dipl.-Geogr. Thomas Regentrop digitalisiert. Diese besondere Datensammlung wird im Folgenden als *Berliner Niederschlagsdatensatz* bezeichnet.

Für den in dieser Arbeit verwendeten Berliner Niederschlagsdatensatz ergibt sich aus der Vielzahl an Datenquellen eine außergewöhnlich hohe Dichte von Standorten mit Niederschlagserfassung im urbanen Gebiet. Aufgrund von Kriegsverlusten sind Daten vorwiegend ab 1951 verfügbar. Auch für Brandenburg besteht eine repräsentative Überdeckung mit Messstationen. Der mittlere Abstand einer Station zu seinen vier nächsten Nachbarn beträgt in Brandenburg rund 18 Kilometer. Im Berliner Stadtgebiet verringert sich diese Distanz auf 2,4 Kilometer, da Messwerte von 140 Standorten innerhalb der Stadtgrenzen vorhanden sind.

Die Messreihen an den einzelnen Standorten überdecken den Gesamtzeitraum nur in Einzelfällen und viele Reihen weisen mehrere Datenlücken auf. Über den fünfzigjährigen Zeitraum haben sich viele Standorte außerdem verändert und es waren in Abhängigkeit des Status und des Betreibers viele unterschiedliche Beobachter an den Messungen beteiligt, wodurch die Qualität der Daten variiert (siehe Tabelle 3-1). Die Einzelmessungen an einigen Standorten sind nur im Kontext mit weiteren Stationen verwertbar. Es wurde darum für diese Arbeit ein Verfahren entwickelt, alle verfügbaren Messungen gefallener Niederschläge in Berlin und Brandenburg in die Auswertung einbeziehen zu können. Insgesamt werden somit Daten von 247 unterschiedenen Messstandorten in der Berechnung der räumlichen Verteilung berücksichtigt. Das kürzeste gemeinsame Messintervall aller Stationen über den Zeitraum von 50 Jahren wird durch Tagessummen gebildet, wodurch die maximale zeitliche Auflösung der Analysen festgelegt ist.

Tabelle 3-1: Zusammenschau der Eigenschaften des Berliner Niederschlagsdatensatzes

| Stationsbetreiber | Anzahl der Stationen | Datenqualität | Datenvollständigkeit |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Berliner Forsten | 11 | gering | gering |
| Berliner Wasserbetriebe | 77 | hoch | Lücken enthalten |
| Berliner Bezirksämter | 9 | gering | gering |
| Deutscher Wetterdienst | 130 | hoch | hoch |
| Privatpersonen | 12 | hoch | abschnittsweise hoch |
| Universitäten | 8 | hoch | hoch |

3.1.1 Vorbereitung der Niederschlagsmessungen

Zweck der Datenvorbereitung war es, aus den verfügbaren Messwerten den größtmöglichen Informationsgewinn bezüglich der Aufgabenstellung zu erzielen. Die Rohdaten wiesen einige Sammelmessungen, Messunterbrechungen sowie vereinzelte Übertragungsfehler auf. Über den Zeitraum der ersten 27 Jahre (1951-1987) wurden durch Herrn Regentrop bei der Datenaufnahme diesbezüglich vereinzelte Korrekturen über räumlich-visuelle Vergleiche vorgenommen. Zur automatisierten Bestimmung von Sammelmessungen, zum Beispiel über die Wochenenden, wurde das Verhältnis vom Maximum der Stationswerte und dem Gesamtmittel an einem Tag betrachtet. Quotienten über 10 wurden als Indiz für Sammelmessungen oder als Fehlerwerte beurteilt und es wurde manuell überprüft, ob es sich bei den einfließenden Angaben um realistische Messwerte handelt. Gab es keine Nachbarstation zur Orientierung oder war der aufsummierte Zeitraum zu lang, so wurde der Wert gelöscht. In Ausnahmefällen, bei Vorhandensein von vertrauenswürdigen Nachbarstationen mit Niederschlagsangaben, wurden kurzzeitige Sammelmessungen von maximal drei Tagen über einen Abgleich auf die Fehltage aufgeteilt. Messpunkte, die nahe beieinander liegen und sich ohne längere Überlappung zeitlich ergänzen, wurden zu einer Datenreihe zusammengefügt, was mit einer Stationsverlegung beim DWD gleichgesetzt wird. Die vorgenommenen Veränderungen im Originaldatensatz wurden in der Metadatenbank vermerkt. Lückenhafte Reihen wurden nicht über Korrelationsbeziehungen mit Werten aus anderen Stationen vervollständigt, damit die Informationen der ergänzenden Stationen nicht von verschiedenen Standorten mehrfach in die Flächeninterpolation einfließen. In die Interpolation der täglichen Niederschlagsverteilungen gehen alle Stationen mit ihren unterschiedlichen Datenverfügbarkeiten in vollem Umfang ein. Für die Tage mit Niederschlagsbeobachtungen konnte kein Unterschied zwischen nicht messbarem und keinem Niederschlag gemacht werden, da beide mit dem Wert Null in der Datenbank erfasst sind.

3.1.2 Flächeninterpolation

In Anlehnung an das Vorgehen von Schönwiese und Birrong (1990) wurde über die räumliche Interpolation eine Transformation der Niederschlagsmesswerte in einen synthetischen Datensatz täglicher Gebiets-

niederschlagshöhen vorgenommen. Alle zur Verfügung stehenden, überprüften Messwerte wurden dabei in eine tageweise durchgeführte Flächeninterpolation einbezogen. Es entsteht ein das ganze Gebiet vollständig überdeckender Datensatz, der für die festgelegten Teilflächen lückenlose Zeitreihen enthält.

Die Flächeninterpolation der Punktmessungen erfolgt in zwei Teilschritten. Für den ersten Schritt wird die *Quadranten-Methode* verwendet (Pfützner et al., 1997). Die Quadranten-Methode basiert auf der Inverse-Distanz-Interpolation (IDW). Dieses räumliche Interpolationsverfahren kann angewendet werden, weil der punktuellen Niederschlagsmessung die Annahme räumlicher Autokorrelation zugrunde liegt. Für Niederschlagssummen über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr ist die Niederschlagsverteilung in unseren Breiten auf diesem Weg reproduzierbar. Die Niederschlagsfelder einzelner Tage können hingegen wegen der unterschiedlichen Genese, Dauer, Ausdehnung und Verlagerung der Einzelereignisse sehr verschiedene räumliche Anordnungen annehmen. Zur räumlichen Interpolation der Tagessummen ist daher ein pragmatischer Ansatz nötig. Auch für die tageweise Interpolation des Niederschlagsfeldes wird angenommen, dass die Bedeutung eines Messwertes mit zunehmender Entfernung abnimmt. Der Standardwert der IDW mit der quadratischen Abnahme des Gewichts einer Station mit zunehmender Entfernung wurde beibehalten.

Aufgrund der nicht zufällig im Raum verteilten Messstandorte im Berliner Niederschlagsdatensatz mit einer sehr hohen Stationsdichte im westlichen Berliner Stadtgebiet im Vergleich zum Brandenburger Umland kann es dazu kommen, dass die vielen Berliner Stationen einen zu starken Einfluss auf die interpolierten Werte im Umkreis von Berlin ausüben.

Ziel der Quadranten-Methode ist, dass Anisotropie nicht überbewertet wird. Es wird zur Berechnung der Zellenwerte im Interpolationsraster nur die jeweils nächstliegende Station je 90° Sektoren verwendet. Damit reduziert sich die mögliche Anzahl der in die Berechnung eingehenden Messwerte auf vier und keine Himmelsrichtung wird vernachlässigt oder überbewertet (siehe Abbildung 3-1). Ein zu starker Einfluss der hohen Stationsanzahl in Berlin auf die angrenzenden Gebiete in Brandenburg wird somit vermieden, ohne die Stationsdichte für eine relativ gleichmäßige Verteilung ausdünnen zu müssen. Die Rasterkantenlänge der Interpolation beträgt 1000 Meter bei einer Gesamtfläche des Berechnungsgebietes von 40.000 Quadratkilometern.

Im zweiten Schritt werden die Resultate der Rasterinterpolation zu Gebietsniederschlägen für Teilgebiete gemittelt (siehe Abbildung 3-1). Die Abdeckung der Teilgebiete mit Messstationen stellt sich für einen zufällig gewählten Beispieltag, 20.03.1991, folgendermaßen dar. In 100 der 636 Teilgebiete liegt mindestens eine Niederschlagsmessstation, in je 10 liegen zwei und drei Stationen und in 8 Teilgebieten innerhalb Berlins befinden sich vier und mehr Stationen. Der auf diese Weise erzeugte synthetische Tagesdatensatz überdeckt das gesamte Untersuchungsgebiet. Über die ausreichend hohe Anzahl von Teilgebieten kann eine räumliche Strukturanalyse durchgeführt werden. Nach der Interpolation des Niederschlagsfeldes für alle Tage des Untersuchungszeitraums besteht für jedes Teilgebiet ein zeitlich vollständiger Datensatz, der auch für Zeitreihenanalysen verwendet werden kann. Dieser Datensatz der täglichen Nieder-

schlagsverteilung ist die Grundlage für die durchgeführte Untersuchung der wetterabhängigen städtischen Niederschlagsmodifikation.

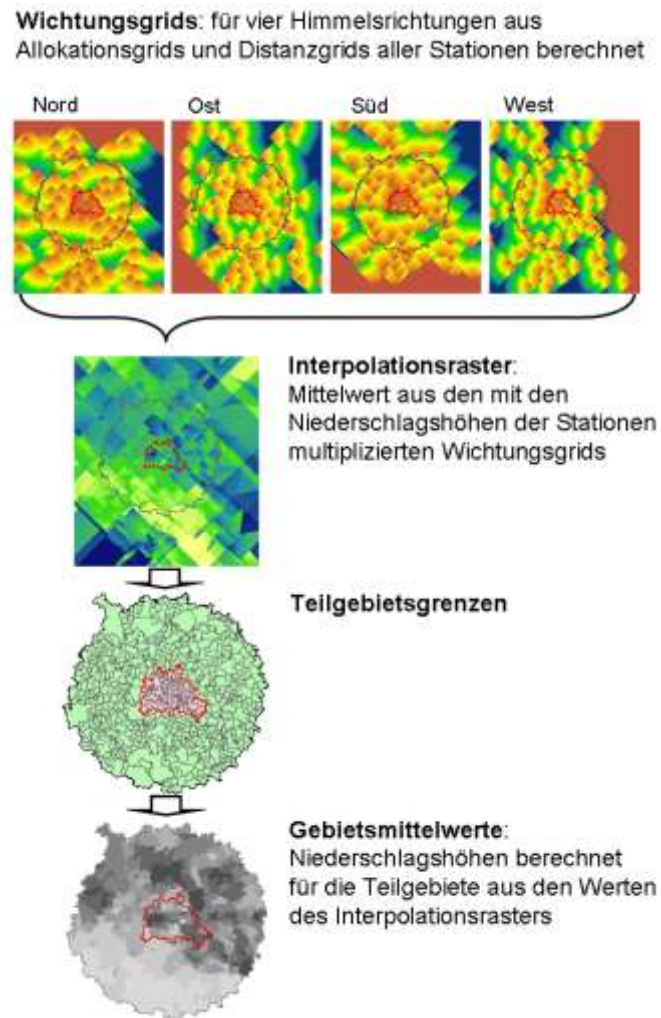
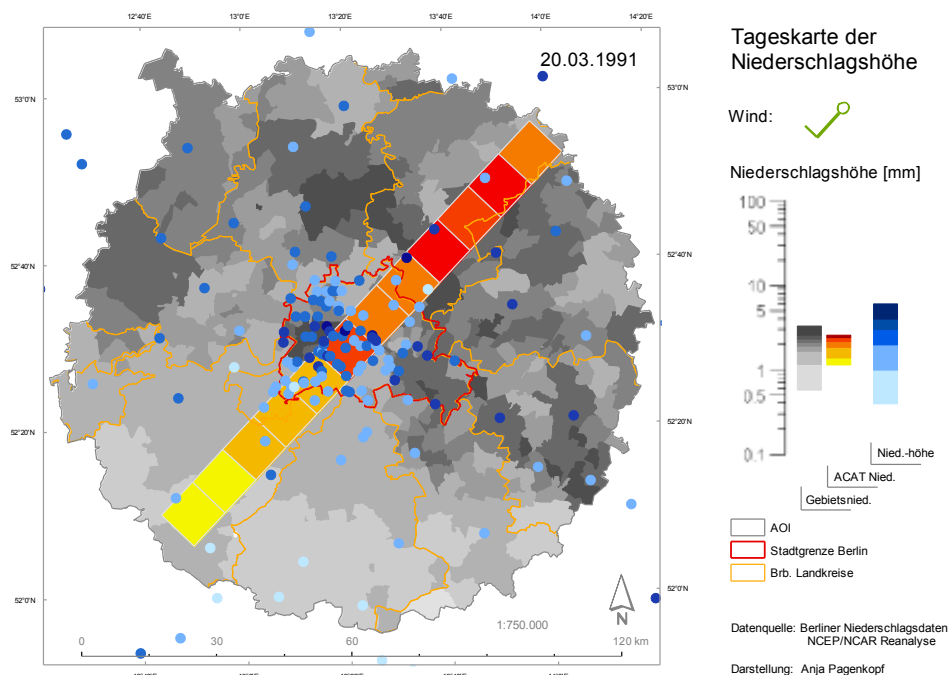


Abbildung 3-1: Schema über die Arbeitsschritte der Flächeninterpolation nach der Quadranten-Methode

3.1.3 ACAT

Für das Auffinden von städtischen Einflüssen auf die räumliche Verteilung des Niederschlages muss grundsätzlich die Windrichtung berücksichtigt werden. Ausgehend von der Sektorbetrachtung des Untersuchungsgebietes, wie zum Beispiel bei Kalb (1962), Changnon (1991) und Schlünzen (2009), oder der Feldeinteilung von Shepherd (2002) mit dem Nachteil, dass nur Luv und Lee bezogen auf das Stadtzentrum unterschieden wird, erfolgt eine Modifizierung der Methode, so dass auch lokale Entwicklungen wiedergegeben werden können. Als Werkzeug für die Analyse der Niederschlagsverteilung unabhängig von der jeweiligen Windrichtung wird deren Struktur auf ein windrichtungsparalleles Band durch das Untersuchungsgebiet übertragen (siehe Karte 3-1). Auf diesem Weg kann die zweidimensionale Anordnung für verschiedene Analysen auf eine räumliche Dimension reduziert werden. Das Band wird in dieser Arbeit als *Adaptive Climatologic Analysis Transect (ACAT)* bezeichnet. Der wesentliche Vorteil der von der

Windrichtung abstrahierten Betrachtungsweise zur Bestimmung des Stadteinflusses ist das gleich bleibende räumliche Lageverhältnis von Luv-, Stadt- und Leebereichen bezogen auf die Bewegungsrichtung der Niederschlagssysteme. Unabhängig von der Windrichtung ergeben sich Profile von den unbeeinflussten ruralen Gebieten über die Luv-Bereiche der vier Bebauungszonen bis zur Stadtmitte, weiter über die Lee-Bereiche in und hinter der Stadt bis in das entfernte Umland (siehe Karte 3-1). Als Rotationszentrum des ACAT wurde der Alexanderplatz als Mitte Berlins gewählt. Die Länge des ACAT beträgt 120 Kilometer, entsprechend dem Durchmesser des Untersuchungsgebietes. Die *ACAT-Elemente* haben eine Kantenlänge von 10 km x 10 km. Die Gebietsmittelwerte der Niederschlagshöhe werden für die ACAT-Elemente aus dem Interpolationsraster berechnet.



Karte 3-1: Fallbeispiel für die Niederschlagsinterpolation eines Tages und die Darstellung des ACAT zum Vergleich mit den Niederschlagshöhen an den einfließenden Messstationen

Die Breite des Transektes wurde mit zehn Kilometern festgelegt, da ein einfaches Profil in Form einer Linie durch das Gebiet zu stark kleinräumige Variabilität hervorgehoben hätte. Ein Streifen, der die gesamte Stadt Berlin beinhaltet, müsste 40 Kilometer breit sein. Unter der Annahme, dass die modifizierende Wirkung des Stadtrandes geringer ist als des inneren Stadtgebietes, könnte dadurch unter Umständen das Signal in den Flächenmittelwerten der ACAT-Elemente zu stark abgeschwächt werden. Ein weiterer Grund, weshalb die Breite des ACAT nicht über die gesamte Ausdehnung der Stadt gewählt wurde, ist die innerhalb eines Tages zum Teil stark variierende Windrichtung, welche dazu führen kann, dass sich der Bereich mit urban modifizierten Niederschlägen in Lee der Stadt räumlich auffächert. Wenn die seitlichen Randbereiche des beeinflussten Niederschlagsgebietes mit einbezogen würden, könnten sie das Signal dämpfen. Die ACAT-Elemente sind eine Dimension kleiner als das zu erwartende Phänomen, aber groß

genug für die repräsentative Wiedergabe der Region. Es wird angestrebt, über den ACAT auch durch Windeinfluss räumlich verschobene Beziehungen untersuchen zu können.

3.1.4 Ableitung vergleichbarer Analysegrößen

Im Folgenden wird die numerische Aufbereitung der Niederschlagsdaten vorgestellt, mit der eine Vergleichbarkeit der auf unterschiedlichen Zusammenstellungen von Daten erzeugten Karten realisiert wird. Dazu wird zunächst in die verwendeten Begrifflichkeiten eingeführt.

Die Teilmengen des Berliner Niederschlagsdatensatzes, die die Daten je einer Konfiguration eines Experimentes enthalten, werden als *Implemented Data Collection (IDC)* bezeichnet. Diese Bezeichnung wird eingeführt, um diese Datenstruktur klar abzugrenzen und ihren Charakter zu verdeutlichen. Es handelt sich um ein Datenensemble, das den Bedingungen einer festgelegten Spezifikation genügt. Beispielsweise umfasst die IDC Konvektionsniederschläge alle Tage, an denen von den Beobachtern an der SYNOP-Station Berlin-Tempelhof überwiegend Schauerniederschlag verschlüsselt wurde. Die Bezeichnung IDC wird eingefügt, um zu verdeutlichen, dass diese Kollektive als eigenständige Analyseelemente verwendet werden, die zwischen Teilmengen der Stichprobe im statistischen Sinne und echten, experimentell erfassten Datensätzen rangieren. Zum Vergleichen und Aufspüren von räumlichen Strukturen in den IDC ist es nötig, auch die Tage mit geringen Niederschlagshöhen gleichberechtigt zu berücksichtigen, die bei Darstellungen von absoluten Niederschlagshöhen sonst nicht ins Gewicht fallen würden. Damit Überbewertungen von besonders starken Niederschlagsereignissen in der räumlichen Struktur vermieden werden, sollen keine absoluten Niederschlagshöhen, sondern nur relative Angaben ausgewertet werden. Für die weitere statistische Verarbeitung und die Verwendung der täglichen Gebietsniederschlagshöhen werden deren Werte deshalb schrittweise in relative Angaben transformiert. Für die Teilgebiete und die ACAT Elemente werden verschiedene Analysevariablen abgeleitet.

Als erster Verarbeitungsschritt wird die *Gebietsanomalie* (Symbol: h_{GA} ; Einheit: mm) für einen Zeitraum oder Teildatensatz als Differenz zwischen dem Gebietsniederschlag eines Teilgebietes (h_{TG}) und dem Gebietsniederschlag des Gesamtgebietes (h_{GG}) berechnet.

Gleichung 3-1:
$$h_{GA} = h_{TG} - h_{GG}$$

Die Karte der Gebietsanomalie beschreibt somit eine Verteilung der absoluten Niederschlagsdifferenzen, die jedoch weiterhin von der absoluten Niederschlagshöhe abhängt.

In einem zweiten Schritt wird die maßeinheitenlose *relative Gebietsanomalie* (Symbol: RGA) als prozentualer Anteil der regionalen Gebietsanomalie am Betrag des Wertebereiches eines jeden Tages berechnet. Die Kartendarstellung der RGA entspricht einer auf den Datensatz normierten Niederschlagshöhenverteilung.

Gleichung 3-2:
$$RGA = \frac{h_{GA} \cdot 100}{(\max(h_{GA}) - \min(h_{GA}))}$$

Die Berechnung einer standardisierten Gebietsanomalie bietet sich für diese Daten nicht an, da sie für einen Tag und auch für die Mittelwerte mehrerer Tage innerhalb des Untersuchungsgebietes nicht normalverteilt, sondern stark linksschief sind (siehe Abbildung 3-3).

Die Gebietsniederschläge des ACAT werden in analoger Weise in relative Angaben umgewandelt, um eine Basis für Vergleiche verschiedener IDC bezüglich der zu analysierenden Faktoren zu schaffen. Ein ACAT eines Tages entspricht der Zuordnung von zwölf Werten zu durchnummerierten ACAT-Elementen. Die Niederschlagshöhen aller Tage der zu betrachtenden IDC werden für jedes ACAT Element unabhängig von der Windrichtung aber eindeutig in ihrer windrichtungsabhängigen Anordnung summiert.

Gleichung 3-3:
$$h_{AEi} = \sum_{t=1}^n h_{AEit}$$

Anschließend werden die Niederschlagssummen jedes ACAT Elemente (Symbol: h_{AEi} ; Einheit: mm) ins Verhältnis zum Mittelwert aller ACAT Elemente gesetzt und so die *Niederschlagsvariation* (Symbol: NV; Einheit: /) berechnet. Zur Erleichterung der Anschaulichkeit wird von dem um eins schwankenden Quotienten 1 subtrahiert.

Gleichung 3-4:
$$NV = \frac{h_{AEi}}{\text{mean}(h_{AE})} - 1$$

Das normierte Äquivalent der absoluten Niederschlagshöhe der ACAT Elemente wird mittels der Niederschlagsvariation verglichen. Für die Untersuchung der *relativen Änderungen* zwischen den Transelementen werden für jeden Tag die Differenzen zwischen den Nachbarelementen von Luv nach Lee berechnet und weiterhin mit der Gesamtschwankungsbreite normiert (Symbol: RA; Einheit: /).

Gleichung 3-5:
$$RA = \frac{(h_{AEi} - h_{AEi+}) \cdot 100}{(\max(h_{AE}) - \min(h_{AE}))}$$

Für die Darstellung einer IDC aus mehreren Tagen werden der Mittelwert und die Standardabweichung der relativen Differenzen berechnet. So kann die mittlere relative Änderung entlang des Transektes bestimmt und verglichen werden.

3.1.5 technische Umsetzung der Datenverarbeitungsschritte

Für die geostatistisch-kartographischen Arbeitsschritte wurde das Programmpaket zur Geodatenverarbeitung ArcGIS 9.3.1 (ESRI) verwendet. Die Quadranten-Methode für die räumliche Interpolation der Messwerte ist nicht im Funktionsumfang von ArcGIS enthalten. ArcGIS bietet jedoch viele Teilfunktionen an, die mit Hilfe der von ArcGIS unterstützten Scriptsprache Python (Version 2.5) zu spezifisch verknüpften Tools kombiniert werden können. Mit Hilfe der Programmierung ist ein einheitliches Vorgehen der Interpolationsschritte garantiert. Durch die modularisierte Struktur können ergänzende Arbeitsschritte

in den Berechnungsablauf eingebunden und angeschlossen werden (siehe Abbildung 3-2). Für die teilautomatisierte Verarbeitung der 18.262 Tagesdatensätze wurden mehrere Python-Skripts programmiert.

Über eine Anbindung an das Datenbanksystem Microsoft Access 2003 wird eine kontrollierte Verwaltung der Datensätze, die in die Interpolation eingehen und als Ergebnisse entstehen, erreicht. Der bedarfsgerechte Datenaustausch erfolgt mittels speziell formulierter SQL-Abfragen. Die Automatisierung einheitlicher Ausgabegraphiken wurde mit Python in ArcGIS generiert. Statistische Auswertungen und die Diagrammdarstellungen wurden mit dem „open source“ Statistikprogramm R 2.9.2 durchgeführt.

Die Ergebnisse der räumlichen Interpolation werden zur graphischen Präsentation als Karte und ACAT-Diagramm auf einheitlich strukturierten Übersichtsblättern zusammengestellt (siehe Abbildung 4-2). Vorangestellt werden als allgemeine Informationen für die Einordnung je vier Zahlangaben. Die *Fallzahl* ist die Anzahl der Tage, aus denen eine IDC gebildet wurde. Der *Anteil an allen Niederschlagstagen* ist die Fallzahl als Prozentwert von allen Niederschlagstagen im Untersuchungszeitraum. Die *mittlere Gesamtsumme* entspricht der Niederschlagssumme über alle Tage des IDC. Die Mittelung erfolgt dabei über die Werte der Teilgebiete im Untersuchungsgebiet. Die räumliche Mittelung für jeden Tag ergibt den Datensatz der mittleren Tagessummen, welcher wiederum gemittelt der mittleren Niederschlagshöhe entspricht. Die Präsentation erfolgt als Karte der räumlichen Niederschlagsstruktur und als Diagramm mit der Niederschlagsvariation entlang des ACAT. Die Skalierung für die Darstellung der Daten wurde so vorgenommen, dass einerseits interne Differenzierungen bestmöglich sichtbar werden und andererseits die IDC untereinander vergleichbar sind. Bei der Interpretation der Verteilungskarten ist zu berücksichtigen, dass die Darstellung der relativen Niederschlagsverhältnisse bezogen auf das Gebietsmittel immer Minimum- und Maximumzonen aufweist. In Karten mit summierten oder mittleren absoluten Niederschlagshöhen müssen die Bereiche nicht deutlich mehr oder weniger Niederschläge aufweisen. Als Zusatzinformation zur Interpretation der Kartendarstellung ist eine achteilige Windrose der relativen Windrichtungshäufigkeiten für die in der IDC enthaltenen Tage abgebildet.

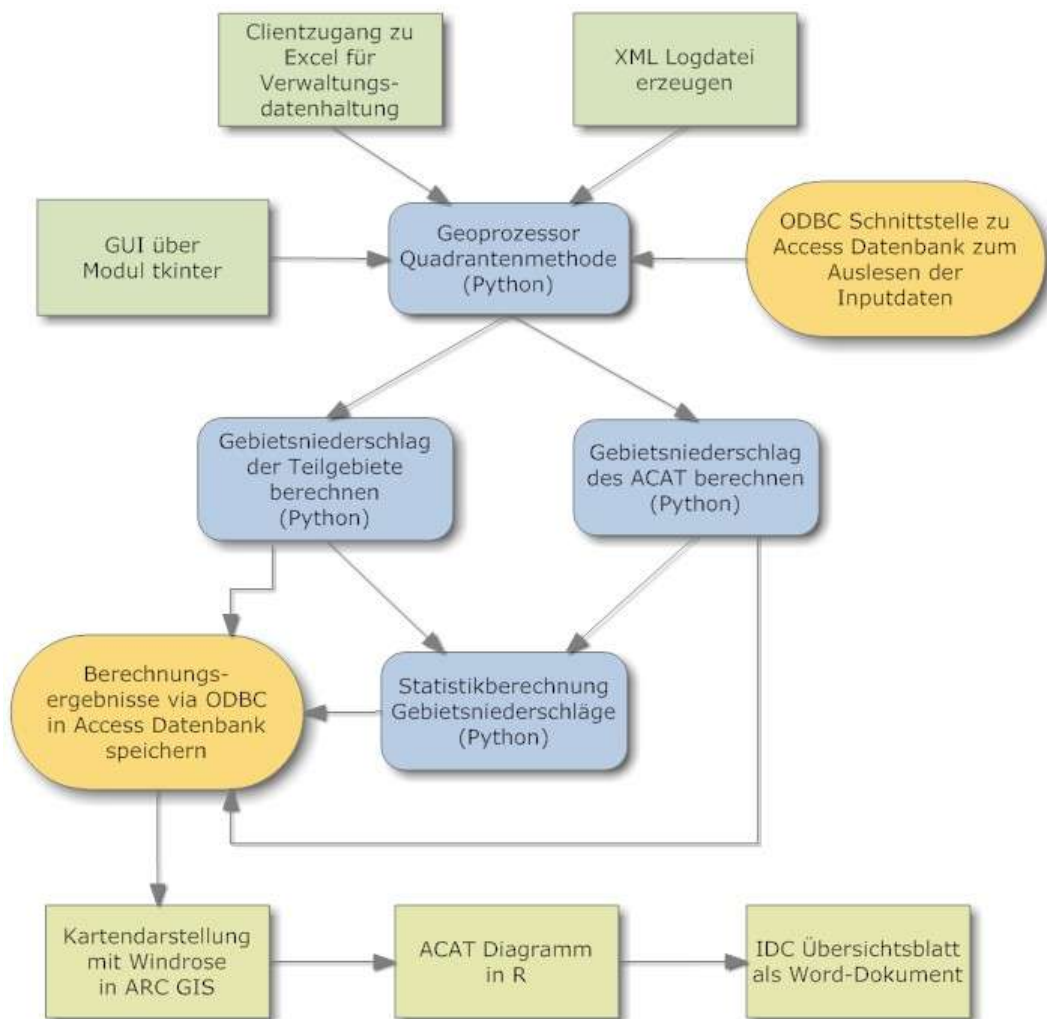


Abbildung 3-2: Flussschema der programmierten Verarbeitungsschritte

3.2 Einflussgrößen

In der Auswertung sollen die speziellen räumlichen Verteilungen des Niederschlags in und um Berlin für klassifizierte meteorologische Rahmenbedingungen erfasst und beschreiben werden. Zur Festlegung der atmosphärischen Verhältnisse werden die Klimaelemente einzeln oder in Kombinationen als Einteilungsgrundlage der Niederschlagsdaten verwendet. Im Folgenden werden die Elemente und die auf sie angewendeten Klassifizierungen vorgestellt.

3.2.1 Niederschlagsdaten

Die Klimaelemente, die als erklärende Variable herangezogen werden, werden in Klassen, die charakteristische Ausprägungen wiedergeben, eingeteilt. Die erste Variable ist der Niederschlag selbst. Er wird in Tage mit und ohne fallenden Niederschlag untergliedert. Als *Niederschlagstag* im Untersuchungsgebiet werden die Tage festgelegt, die an mindestens 20 Stationen eine Niederschlagshöhe größer Null aufweisen und bei denen die Summe aller Stationen mehr als vier Millimeter beträgt.

Für die Unterscheidung der Niederschlagsverteilung in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität werden fünf Intensitätsstufen der täglichen Niederschlagshöhe festgelegt (siehe Abbildung 3-3, Tabelle 3-2):

- Die erste Klasse umfasst die Tage mit besonders schwachen Niederschlägen. An diesen Tagen liegt kein Teilgebietswert im Untersuchungsgebiet über 1,5 mm. Diese Klasse der *Schwachniederschlagstage* umfasst 20 Prozent aller Regentage.
- Die zweite Klasse ist die Klasse der *Durchschnittsniederschlagstage* mit dem höchsten Teilgebietswert zwischen 1,5 mm und 10 mm. Sie umfasst 60 Prozent aller Tage, da sie sich über den Bereich zwischen dem 20. und 80. Quantil erstreckt.
- Die verbleibenden 20 Prozent der Niederschlagstage sind in Intensivniederschlagstage, Starkniederschlagstage und Extremniederschlagstage untergliedert. Die *Intensivniederschlagstage* sind noch keine Extremereignisse, weisen aber mit Maximalwerten zwischen 10 mm und 30 mm am Tag für den Berliner Raum beträchtliche Niederschlagshöhen auf. Diese Klasse umfasst 18 Prozent aller Niederschlagstage. Die Obergrenze der Intensivniederschlagstage ist über das 98. Quantil festgelegt.
- Die Klasse der *Starkniederschlagstage* umfasst die Tage mit einem höchsten Teilgebietswert zwischen 30 mm und 50 mm.
- Niederschlagstage mit Teilgebietswerten über 50 mm könnte man schon als Katastrophenregen bezeichnen. Sie entsprechen einem fünfjährigen Ereignis nach KOSTRA (Malitz und Rudolf, 2009). Diese Gruppe der *Extremniederschlagstage* umfasst mit 49 Fällen nur 0,4 Prozent aller Regentage.

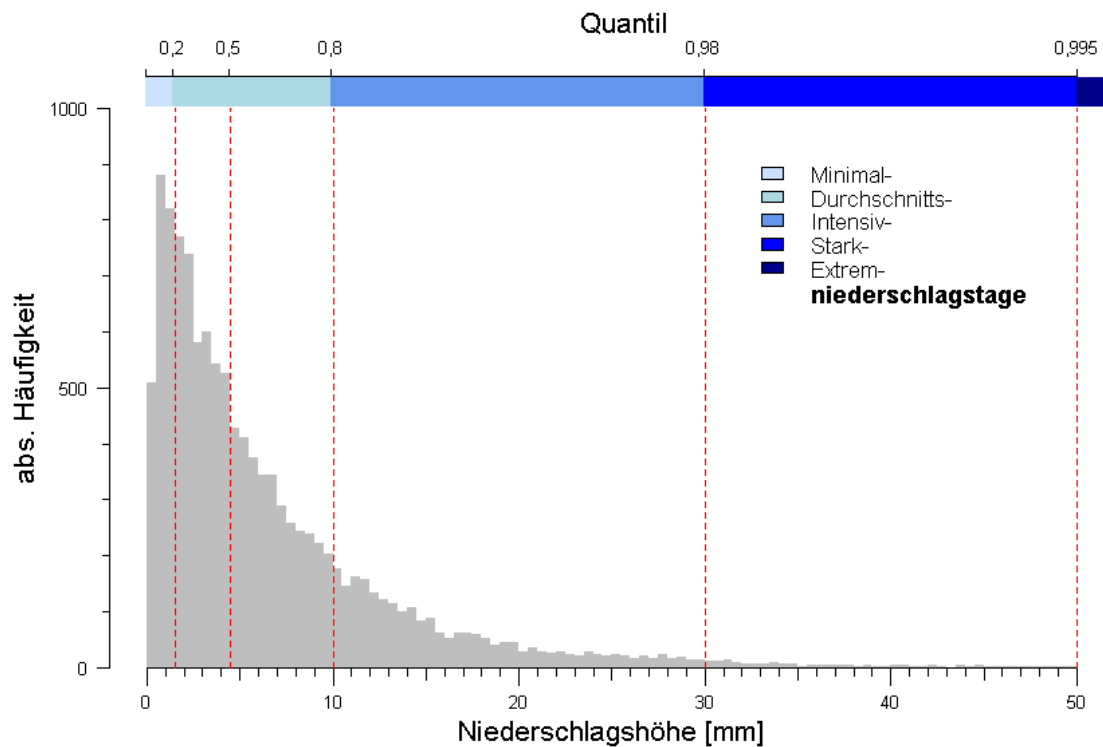


Abbildung 3-3: Häufigkeitsverteilung der höchsten täglichen Teilgebietssumme im Untersuchungsgebiet (Berlin und umgebende Gebiete Brandenburgs) für den Zeitraum 1951-2000

Tabelle 3-2: Übersicht der Niederschlagsintensitätsklassen abgeleitet aus den höchsten täglichen Teilgebietssummen im Untersuchungsgebiet (Berlin und umgebende Gebiete Brandenburgs) für den Zeitraum 1951-2000

| Intensitätsklasse | Quantil | Obergrenze [mm] |
|--------------------------------|---------|-----------------|
| Schwachniederschlagstage | 0,2 | 1,5 |
| Durchschnittsniederschlagstage | 0,8 | 10 |
| Intensivniederschlagstage | 0,98 | 30 |
| Starkniederschlagstage | 0,995 | 50 |
| Extremniederschlagstage | 1 | 150 |

3.2.2 Daten aus synoptischen Augenbeobachtungen an einer Wetterstation

Eine Untersuchung der Niederschläge in Abhängigkeit vom *Niederschlagstyp* und *Wolkenklasse* erfolgt durch die Verwendung von Daten aus synoptischen Augenbeobachtungen an einer Wetterstation. Für die Klassifizierung der Niederschlagstage nach dem Wettergeschehen werden die Augenbeobachtungen an der DWD SYNOP-Station auf dem Flughafen Berlin-Tempelhof, WMO-Kennziffer 10384, verwendet

(Deutscher Wetterdienst, 2006). Die Station liegt zentral im Stadtgebiet Berlins und hat dennoch nur sehr geringe Horizonteinschränkungen. Zusätzliche Daten jeder weiteren Station würde die Sicherheit der Aussage bezogen auf die Fragestellungen dieser Arbeit nicht erhöhen können, da es zum Beispiel um die Neigung zu konvektiven Niederschlägen und nicht um deren absolutes Auftreten geht. Die durchgängig über den gesamten Untersuchungszeitraum vorliegenden Beobachtungen sind aufgrund der hohen Verantwortlichkeit der Beobachter gegenüber dem Flughafenbetrieb als vertrauenswürdig einzustufen.

Niederschlagstyp

Die stündlichen SYNOP-Meldungen nach dem WMO-Schlüssel FM 12 (World Meteorologic Organisation, 2010) wurden zu Tageswerten zusammengefasst. Bei der Aggregation der synoptischen Meldungen zum Wettergeschehen ist zu berücksichtigen, dass bei gleichzeitigem Auftreten zweier Wettererscheinungen oder dem Vorhandensein von zwei Phänomenen in der letzten Stunde immer nur das Wetter mit der höheren Schlüsselziffer angegeben wird. Für die Festlegung des Niederschlagstyps wurde aus dem Wetterverlauf W in der SYNOP-Schlüsselgruppe 7 der höchste Wert eines Tages verwendet. Bei Beobachtung von Gewittern (Schlüsselnummer 9) oder Schauern (Schlüsselnummer 8) wurden diese Tage als Tage mit *Konvektionsniederschlägen* klassifiziert. Damit ist es aber durchaus möglich, dass an diesen Tagen auch advektive Niederschläge fielen. Die Klasse der *advektiven Niederschläge* umfasst Sprühregen (Schlüsselnummer 5), Regen (6) und Schnee (7). Die Tage mit Konvektionsniederschlägen werden auch als Schauertage bezeichnet und die Tage mit Advektionsniederschlägen als Regentage. Es muss beachtet werden, dass diese Klasse der Regentage nicht gleichzusetzen ist mit Niederschlagstagen, da sie nur eine Teilmenge aller Tage mit fallendem Niederschlag ist.

Wolkenklasse

Die Wolkenklasse der konvektiven Niederschlagswolke setzt sich aus den tiefen Wolken mit den Schlüsselnummern Cl 2, Cl 3 und Cl 9 zusammen, die den Wachstumsstadien vom Cumulus mediocris bis zum Cumulonimbus capillatus entsprechen. Zu den advektiven Niederschlagswolken wurden die mittelhohe Aufzugsbewölkung Altocumulus und Altostratus mit der Schlüsselnummer Cm 7, die Regenwolke Nimbostratus mit dem mittelhohen Wolkenschlüssel Cm 2 sowie der niedrige Schlechtwetter Stratus fractus, der sich bei Niederschlag oft unter Nimbostratus bildet, mit dem Wolkenschlüssel Cl 7, gezählt (siehe Tabelle 3-3). Wenn an einem Tag beide Wolkenklassen beobachtet wurden, wird dieser Tag der Klasse zugeordnet, die am häufigsten beobachtet wurde. Wenn beide Wolkenklassen die gleiche Häufigkeit aufweisen, wird in Anlehnung an die Priorität der Wolkenverschlüsselung die Klasse der Konvektionswolken diesem Tag zugeordnet. Weil die Tagessumme des Niederschlages um 06:00 UTC gemessen wird, erfolgt auch die Tageswertbildung der Augenbeobachtungen zu diesem Termin.

Tabelle 3-3: Zuordnung des Wolkenschlüssels in Klassen von Niederschlagswolken

| Wolkenklasse | Wolkengattung und SYNOP-Schlüssel |
|--------------------------------|---|
| konvektive Niederschlagswolken | Cumulus congestus (CI 2), Cumulonimbus calvus (CI 3), Cumulonimbus capillatus (CI 9) |
| advektive Niederschlagswolken | Alto cumulus, Altostratus (Cm 7) Altostratus opacus oder Nimbostratus (Cm 2), Schlechtwetter Stratus fractus (CI 7) |

3.2.3 Reanalysedaten

Die Dynamik in der Troposphäre spielt eine wichtige Rolle für die Niederschlagsverteilung, darum werden Angaben der dominierenden Luftbewegung im Untersuchungsgebiet herangezogen. Es werden Daten für Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie für die Vertikalbewegung (Omega) aus einem Reanalysedatensatz entnommen. Reanalysedaten sind das Ergebnis einer rückwirkenden Modellierung der Troposphäre mit Wettervorhersagemodellen basierend auf allen verfügbaren Messwerten. Es wurde der von NCEP/NCAR des Earth System Research Laboratory (ESRL) der NOAA mit einer Rasterweite von 2,5 Grad erstellte Reanalysedatensatz verwendet (Kalnay et al., 1996). Dieser Datensatz ist weltweit über den gesamten Untersuchungszeitraum mit einer zeitlichen Auflösung von Tagesmittelwerten verfügbar. Für die Charakteristik der Atmosphäreneigenschaften im Untersuchungsgebiet wurden die Daten der vier Rasterzellen zwischen 50° n.B. und 55° n.B. sowie 10° ö.L. und 15° ö.L. verwendet. Die Variablen des Reanalysedatensatzes werden für verschiedene Höhengniveaus bereitgestellt. Die Ergebnisse der vier Druckflächen 1000 hPa (Boden), 925 hPa, 850 hPa und 700 hPa wurden daraus entnommen, um die mittleren Verhältnisse in der unteren Troposphäre wiedergeben zu können.

Wind

Eine mittlere tägliche Windrichtungsangabe aus Stationsmessungen ist klimatologisch nicht sehr belastbar, da die Windrichtung an einzelnen Tagen über mehr als 180° variieren kann. Als Tageswert wird darum üblicher Weise die häufigste Windrichtung des Tages, der Modus bezogen auf einen 30 Grad-Sektor, bestimmt. Auf Stationswerte wurde nicht zurückgegriffen, da eine Aussage über die durchschnittlichen Windverhältnisse des gesamten Untersuchungsgebietes mit einer einzelnen Station nicht möglich ist. Die Verwendung mehrerer Stationen hingegen bringt eine noch höhere Variabilität und damit Unsicherheit in der Auswertung mit sich (Malberg und Frattesi, 1990). Des Weiteren messen die Bodenstationen nur in einer Höhe von zehn Meter über dem Boden, die Niederschlagswolken bewegen sich jedoch in deutlich größeren Höhen. Deshalb werden keine Windmessungen von diesen Stationen verwendet, sondern die mittleren Windangaben den Reanalysedaten entnommen. Aus den zonalen (u) und der meridionalen (v) Komponenten des Windes der vier ausgewählten Rasterzellen in den vier festgelegten Druckflächen wurde der Vektormittelwert berechnet. Die Windrichtungsangaben wurden acht 45°-Sektoren zugeordnet.

Da kein linearer Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und der Position einer Leeanomalie anzunehmen ist, wurden die Windgeschwindigkeitsangaben in drei Stufen eingeteilt.

- *Schwachwindtage* liegen im ersten Quartil und haben eine Windgeschwindigkeit von weniger als vier Meter pro Sekunde.
- Die Klasse der *Starkwindtage* entspricht dem vierten Quartil mit mehr als neun Metern pro Sekunde.
- Alle dazwischen verbleibenden Tage entsprechen der *mittleren Windgeschwindigkeit*.

Vertikalbewegung

Für die Vertikalbewegung Omega wurde das arithmetische Mittel über die 16 Teildatensätze berechnet. Die Omegawerte haben die Einheit Hektopascal pro Sekunde, bei aufsteigender Luftbewegung mit negativem Vorzeichen. Der Datensatz der Omega-Werte wurde in sechs Klassen in Abhängigkeit von der Häufigkeitsverteilung eingeteilt (siehe Tabelle 3-4). Für diese Einteilung wurden allerdings nur die Niederschlagstage hinzugezogen, da sonst die Klassenbildung nicht ausreichend trennend ausgefallen wäre. Die erste Klasse entspricht intensiver Hebung und umfasst die oberen zehn Prozent. Die nächsten drei Gruppen weisen Hebung abnehmender Stärke auf. Die fünfte Klasse umfasst die schwachen und die sechste die mäßigen Absinkbewegungen (siehe Abbildung 3-4).

Tabelle 3-4: Übersicht der Klassen mittlerer Omega-Werte, im Gebiet zwischen 10°-15° ö.L. und 50°-55° n.B, für Niederschlagstage von 1951 bis 2000 aus den NCAR-NCEP Daten

| Klassen | Quantil | Obergrenze [hPa/s] |
|--------------------|---------|--------------------|
| sehr starke Hebung | 0,1 | -0,08 |
| starke Hebung | 0,3 | -0,04 |
| mäßige Hebung | 0,5 | -0,02 |
| schwache Hebung | 0,7 | 0,01 |
| schwaches Absinken | 0,9 | 0,05 |
| mäßiges Absinken | 1 | 0,15 |

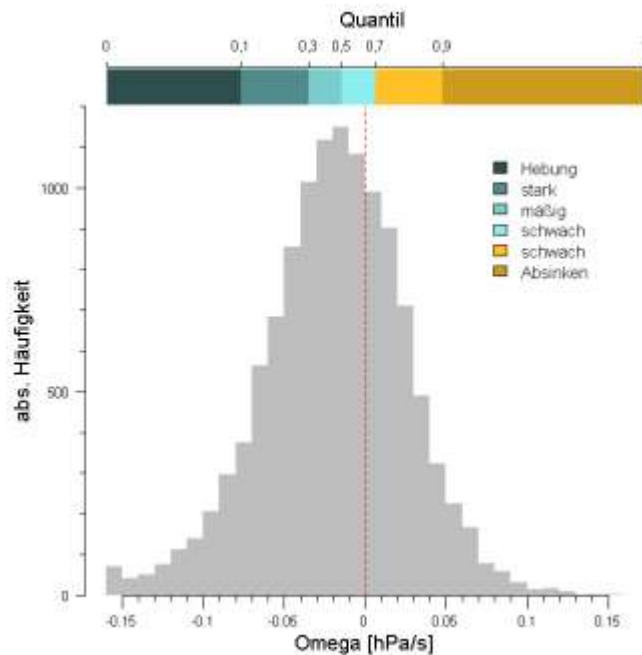


Abbildung 3-4: Häufigkeitsverteilung der mittleren Omega Werte, im Gebiet zwischen 10°-15° ö.L. und 50°-55° n.B für Niederschlagstage von 1951 bis 2000 aus den NCAR-NCEP Daten

Temperatur

Zusätzlich werden für die Festlegung von *Tagen mit einer urbanen Wärmeinsel* in Berlin die Temperaturdifferenzen zwischen den Tagesmittelwerten der Station Berlin-Tempelhof und der mittleren Tagestemperatur des NCEP-NCAR Reanalysedatensatzes für das 5x5 Grad Raster zwischen 50° und 55° nördlicher Breite und 10° und 15° östlicher Länge gebildet. Auf diesem Weg werden nicht nur Stationen innerhalb und außerhalb des Stadtgebietes verglichen, sondern auch die Abweichung der Stadttemperatur vom großräumigen Mittelwert erfasst. Der tägliche Gebietsmittelwert entspricht dem Mittelwert der Lufttemperaturwerte der vier Rasterzellen auf dem 1000 hPa Niveau.

3.2.4 Wetterkarte

Die Niederschlagsverhältnisse sollen nicht nur nach dem beobachteten Niederschlagstyp, sondern auch nach der aus der Wetterkarte für den Berliner Raum analysierten zyklonalen Aktivität und den Luftmassen unterschieden betrachtet werden. Die benötigten Informationen zu Frontpassage und Luftmasse über Berlin wurden den dreistündigen Angaben der „Berliner Wetterkarte“ (1952-2000) entnommen. Frontangaben liegen seit dem 06.12.1952 vor. Diese Informationen wurden ebenfalls zu Tageswerten aggregiert.

Frontklassen

Die Angaben über die Fronten in Berlin wurden zu fünf Frontklassen zusammengefasst (siehe Tabelle 3-5). Alle Tage im Untersuchungszeitraum wurden einer Frontklasse zugeordnet. Bei Frontdurchgang wurde die an einem Tag am häufigsten aufgeführte Frontklasse bestimmt und als dominierende Eigenschaft festgelegt. Für die Auswertung wurden nur die *Tage mit und ohne Frontpassage* unterschieden. Tage mit Frontpassage umfassten die Frontklassen Warmfront, Kaltfront und Okklusion. Übergang und ohne Frontangaben wurde zu Tagen ohne Frontpassage zusammengefasst.

Tabelle 3-5: Zuordnung der Angaben zur Frontpassage in der Berliner Wetterkarte zu Klassen ähnlichen Fronttyps

| Frontklassen | Frontangaben in der Berliner Wetterkarte |
|-------------------|---|
| Warmfront | Warmfront, maskierte Warmfront, Bodenwarmfront, Höhenwarmfront, Warmokklusion |
| Kaltfront | Kaltfront, maskierte Kaltfront, Bodenkaltfront, Höhenkaltfront, Kaltokklusion |
| Okklusion | Okklusion, Höhenokklusion |
| Übergang | Luftmassenübergang ohne Front, Luftmassenumwandlung, Konvergenzlinien, Trogachsen |
| ohne Frontangaben | Tage, an denen nur Luftmassenangaben vorhanden waren |

Tabelle 3-6: Zuordnung der Luftmassenangaben in der Berliner Wetterkarte zu Klassen ähnlichen Luftmassentyps

| Luftmassenklasse | Luftmassenangabe in der Berliner Wetterkarte nach Scherhag und nach Geb |
|-------------------------------------|--|
| kontinental Nord | kontinentale Arktikluft (ca, cpa), kontinentale Polarluft (cp) |
| maritim Nord | maritime Arktikluft (ma, mpa), maritime Polarluft (mp), Arktikluft (xa), Polarluft (xp) |
| kontinentale Luft der Mittelbreiten | kontinentale Luft der Mittelbreiten (csp), erwärmte Subpolarluft (xps, cps), kontinentale gemäßigte Luft (ctp), gealterte kontinentale Polarluft (cpt) |
| maritime Luft der Mittelbreiten | maritime Luft der Mittelbreiten (msp), maritime erwärmte Subpolarluft (mps), maritime gemäßigte Luft (mtp), maritime gealterte Polarluft (mpt), Luft der Mittelbreiten (xsp) |
| kontinental Süd | kontinentale Subtropikluft (cs, cts), kontinentale Tropikluft (ct) |
| maritim Süd | maritime Subtropikluft (ms) , maritime Tropikluft (mt, mts), Tropikluft (xt), Subtropikluft (xs) |

Luftmassen

Die Informationen zu Luftmassen in Berlin beginnen am 01.01.1958. Zum 01.04.1972 gab es einen Wechsel in der Ausweisung der Luftmassen von der Einteilung nach Scherhag zu der nach Geb (Vogt, 2000). Für eine gemeinsame Verwendung der beiden Luftmasseneinteilung wurden sie sechs sehr allgemeinen Luftmassenklassen zugeordnet (siehe Tabelle 3-6). Das Ursprungsgebiet der maritimen Luftmassen befindet sich über dem Atlantik, oder sie sind langsam über die Nord- und Ostsee oder das Mittelmeer gezogen, bevor sie in Berlin angekommen sind. Zu den Luftmassen von Norden wurden alle aus Subpolar- und Polargebieten stammenden Luftmassen zusammengefasst, die durchschnittlich kälter sind als die Luft über Mitteleuropa. Den Gruppen der Südluft entsprechen subtropische und tropische Luftmassen, die wärmer sind. Als Luftmassen der Mittelbreiten wurden alle anderen zusammengefasst. Ihre Entstehungsgebiete liegen in einer mit dem Untersuchungsgebiet vergleichbaren solaren Einstrahlungszone.

3.2.5 Großwettertypen

Die Großwetterlagen (GWL) sollen den Strömungszustand für ganz Europa beschreiben. In die Festlegung der GWL gehen übergeordnete Windrichtung sowie die Zyklonalität als Hebungstendenz ein. Mit der den GWL zugeordneten Strömung ist ein Luftmassentransport verbunden, der bestimmte Luftmassen nach Mitteleuropa transportiert. Damit bieten die GWL als kumulative Größe theoretisch eine gute Möglichkeit der erklärenden Niederschlagsdifferenzierung. Die 32 unterschiedenen Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky (Gerstengarbe und Werner, 2006) werden zu acht Großwettertypen (GWT) zusammengefasst, entweder mit dem Fokus auf der dominanten Strömungsrichtung oder der ausgewiesenen zyklonalen und antizyklonalen Prägung in Mitteleuropa.

3.2.6 Jahreszeiten

Eine jahreszeitliche Differenzierung des Niederschlagsdatensatzes wurde nach den meteorologischen Jahreszeiten vorgenommen. Der Sommer entspricht den Monaten Juni, Juli und August und der Winter den Monaten Dezember, Januar und Februar. Die Übergangsjahreszeiten wurden nicht berücksichtigt, da sie keine eindeutige Charakteristik aufweisen.

Tabelle 3-7: Zuordnung der Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky zu Klassen nach der Strömungsrichtung und zu Klassen nach der Zyklonalität (Abkürzungen der Großwetterlagen siehe (Gerstengarbe und Werner, 2006))

| Großwettertypen (Strömungsrichtung) | Großwetterlagen |
|--|------------------------------|
| Südwest | SWA, SWZ |
| West | WA, WZ, Ws, WW |
| Nordwest | NWA, NWZ |
| Nord | NA, NA, HNA, HNZ, HB, TRM |
| Nordost | NEA, NEZ |
| Ost | HFA, HFZ, HNFA, HNFZ |
| Südost | SEA, SEZ |
| Süd | SA, SZ, TB, TRW |
| Tief Mitteleuropa | TM |
| Hoch Mitteleuropa | HM, BM |
| Unbestimmt | U |

| Großwettertypen (Zyklonalität) | Großwetterlagen |
|---|------------------------|
| SW antizyklonal | WA, BM, WW, SWA |
| SW zyklonal | WZ, WS, SWZ |
| NW antizyklonal | NWA, NA, HNA, HB |
| NW zyklonal | NZ, HNZ, NWZ |
| NO antizyklonal | NEA, HFA, HNFA |
| NO zyklonal | NEZ, HFZ, TM, HNFZ |
| SO antizyklonal | SEA, SA, TB, HM, TRW |
| SO zyklonal | SEZ, SZ, TRM |
| Unbestimmt | U |

3.2.7 Landnutzung/ Landbedeckung

Zur Beschreibung der Landnutzung und Landbedeckung im Untersuchungsgebiet wurde der CORINE Landcover (CLC) Datensatz verwendet. Die Angaben des CORINE Datensatzes sind abgeleitet aus Satelliteninformationen von Szenen aus dem Jahr 2000, der vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) herausgegeben wurde (DLR-DFD, 2004). Damit spiegelt dieser Datensatz den Zustand am Ende des Untersuchungszeitraums wider. Die Daten wurden mit einer Rastergröße von 100x100 Meter verarbeitet. Für die Auswertung wurden die ausgewiesenen Corine Landnutzungs- und Landbedeckungstypen zu fünf Landnutzungsklassen zusammengefasst (siehe Tabelle 3-8).

Tabelle 3-8: Zusammenfassung der Landnutzungsklassen aus CORINE2000 Landnutzungs- und Landbedeckungstypen zu aggregierten Landnutzungstypen

| Landnutzungstyp | CORINE Klasse | Fläche km ² | Σ km ² |
|------------------------------------|--|--|-------------------|
| bebaute Fläche (versiegelt) | 11 Flächen städtischer Prägung 121 Industrie- und Gewerbeflächen 122 Straßen und Eisenbahn 123 Hafengebiete | 1200 167 13 0,4 | 1380 |
| offene Flächen | 124 Flughäfen 13 Deponien und Abraumhalden, Baustellen 33 Flächen ohne Vegetation | 51 30 20 | 101 |
| Grünland und Acker | 14 städtische Grünflächen und Sportplätze 21 Ackerland, nicht bewässert 23 Wiesen und Weiden 24 Ackerland auf nat. Böden 321 natürliches Grasland 322 Heiden 41 Sümpfe und Moore | 112 4214 183 62 106 7 42 | 5857 |
| Wald | 222 Obst- und Beerenobstbestände 31 Wald 24 Wald-Strauchübergangsstadien | 31 4688 03 | 4821 |
| Wasser | 51 Gewässerläufe und Wasserflächen | 332 | 332 |

Innerhalb des Untersuchungsgebietes nehmen landwirtschaftlich genutzte Flächen rund 57 Prozent ein, Wälder rund 34 Prozent und bebaute Flächen rund 7 Prozent. Für jede Klasse wurde der prozentuale Anteil an den Teilgebieten und den ACAT Elementen bestimmt (siehe Karte 2-1).

3.2.8 Geländemodell

Das Höhenmodell des Untersuchungsgebietes wurde aus dem digitalen Höhenmodell der NASA extrahiert, das bei der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) des Space Shuttle Endeavour im Februar 2000 aufgenommen und durch Rabus et al. (2003) aufbereitet wurde. Die Rastergröße dieses Datensatzes beträgt drei Bogensekunden, was etwa 90 Metern entspricht. Für die statistische Auswertung wurden die Werte in die räumliche Auflösung der Niederschlagsdaten übertragen, indem sie zu Mittelwerten der Teilgebiete und ACAT Elemente zusammengefasst wurden.

4 Auswertung

Die Analyse von Niederschlagsdaten bezogen auf stadtklimatologische Fragestellungen muss berücksichtigen, dass sich die gemessenen klimatologischen Verhältnisse immer aus den drei Komponenten klimatischer Hintergrund, lokales Relief und urbane Modifikation zusammensetzen (Lowry, 1998). Für die Bestimmung des modifizierenden Anteils eines größeren Stadtkörpers ist es nötig, die drei Komponenten separat zu erfassen, beziehungsweise einzelne Teilkomponenten weitestgehend „konstant zu halten“. Dazu wurde für diese Arbeit das *Klimaexperiment* auf der Basis bereits gemessener Daten konzipiert. Die damit verbundene Hypothesenbildung basiert auf der Grundlage physikalischer Prozessüberlegungen. Die Datenauswahl für ein Experiment erfolgt, indem der Berliner Niederschlagsdatensatz nach den Merkmalen eines oder mehrerer Einflussfaktoren gruppiert wird. Die gemeinsame Datengrundlage hat zur Folge, dass die einzelnen Experimente nicht statistisch unabhängig voneinander sind. Dadurch ist es möglich, dass gleiche Aussagen auf unterschiedlichen Wegen entstehen oder zwei Experimente sich zu einer Aussage ergänzen können. Unter anderem werden generell auch Kombinationen von Faktoren konstruiert, um die Erklärungstiefe zu vergrößern und zu registrieren, welche Variable die dominierenden Effekte hervorruft.

Mit der Auswertung der Experimente kann keine direkte räumliche Korrelation der Niederschlagshöhen zu Atmosphäreneigenschaften bestimmt werden, da insbesondere die atmosphärischen Einflussfaktoren nicht konstant im Raum verteilt sind, ihre Auswirkungen sich außerdem nicht richtungsabhängig verhalten und in mehreren Größenordnungen auftreten können. Die Untersuchung der wetterabhängigen Niederschlagsstruktur mit urbanem Einfluss erfolgt vorwiegend über ein exploratives Vorgehen mittels einer visuellen Kartenanalyse. Dabei werden die mittleren Verteilungen der relativen Gebietsanomalie (RGA) für die definierten Atmosphärenzustände verschiedener „Experimentkonfigurationen“ dargestellt und interpretiert. Anschließend werden unterschiedliche Atmosphärenzustände genauer beschrieben und damit die zugehörigen Tage und deren Variabilität innerhalb der IDC eingeschränkt. Dabei handelt es sich um ein *einfaktorielles Experiment*, wenn der Gesamtdatensatz nur in die Klassen eines atmosphärischen Einflussfaktors gruppiert wird. Wird die Kombination der Klassen von zwei oder drei Einflussfaktoren auf die Daten angewendet, handelt es sich um *zweifaktorielle beziehungsweise dreifaktorielle Experimente*.

Die Datenauswertung ist jeweils in zwei Teile gegliedert. Es wird die kartographische Darstellung der räumlichen Niederschlagsverteilung für das Untersuchungsgebiet, als klimatologische Analyse, und der ACAT, als windrichtungsbezogene Betrachtung, verwendet. Für jedes Experiment wurden für die visuelle Interpretation der IDC Daten diese beiden Aggregations- und Darstellungsformen der Niederschlagsdaten in einem Datenblatt zusammengestellt (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Mit der relativen Gebietsanomalie für die administrativen Teilgebiete werden die räumlichen Unterschiede unabhängig von den absoluten Niederschlagshöhen der einzelnen Tage und der Anzahl der einfließenden Tage dargestellt. Im ACAT Diagramm wird die Niederschlagshöhe explizit hinsichtlich der windrichtungsparallelen An-

ordnung durch das Untersuchungsgebiet erfasst. Es werden sowohl die Abfolge der absoluten Niederschlagshöhen als Niederschlagsvariabilität als auch die Abfolge der relativen Änderungen abgebildet. Die Niederschlagsvariabilität ist als breiter Balken im ACAT Diagramm dargestellt. Die Mittelwerte aller Niederschlagstage des Untersuchungszeitraums sind als Referenz mit roten Strichmarken in das Diagramm eingefügt. In den ACAT Diagrammen sind zusätzlich die Mittelwerte der relativen Änderungen zwischen den benachbarten ACAT Elementen als dünne blaue Balken abgebildet. An die Balkenenden sind nach oben und unten gerichtete Linien der einfachen Standardabweichung angefügt (siehe Abbildung 4-1).

Am Beispiel der Darstellung der *IDC alle Niederschlagstage* soll das Vorgehen der Karteninterpretation verdeutlicht werden. Die Karte der Gebietsanomalie weist als dominante räumliche Strukturen eine Maximumzone im Norden und Nordosten Berlins und ein innerstädtisches Minimum auf. Damit ist eine gute Übereinstimmung mit der Verteilung der mittleren Jahressumme über den Untersuchungszeitraum vorhanden (siehe Abbildung 4-2 und Karte 2-5). Im Verlauf des ACAT ergeben sich allerdings nur minimale Unterschiede in der Niederschlagsvariation. Am deutlichsten tritt das Minimum im Oderbruch hervor. Das Stadtminimum und ein schwaches Lee-Maximum sind angedeutet, aber auch eine geringe positive Abweichung im luvseitigen Umland der Stadt ist zu erkennen. Eine leichte Zunahmetendenz ergibt sich im Übergang vom Umland in den Vorortring und eine stärkere vom Stadtminimum bis in den Vorortring in Lee der Stadt. Diese schwach ausgeprägte allgemeine Verteilung entspricht den gemittelten Verhältnissen aus vielen verschiedenen Niederschlagsbedingungen, die zum Teil verschiedene räumliche Strukturen hervorrufen und sich so zum Teil verstärken, aber auch abschwächen können.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der betrachteten Experimente zusammengefasst beschrieben. In der Diskussion erfolgt die Einordnung und Analyse der Ergebnisse. Aufgrund der vielfältigen Veröffentlichungen über die urbane Verstärkung der Sommerschauer beginnt diese Auswertung auch mit der Betrachtung der unterschiedlichen räumlichen Niederschlagsverhältnisse bei beobachteten konvektiven und advektiven Niederschlagsereignissen.

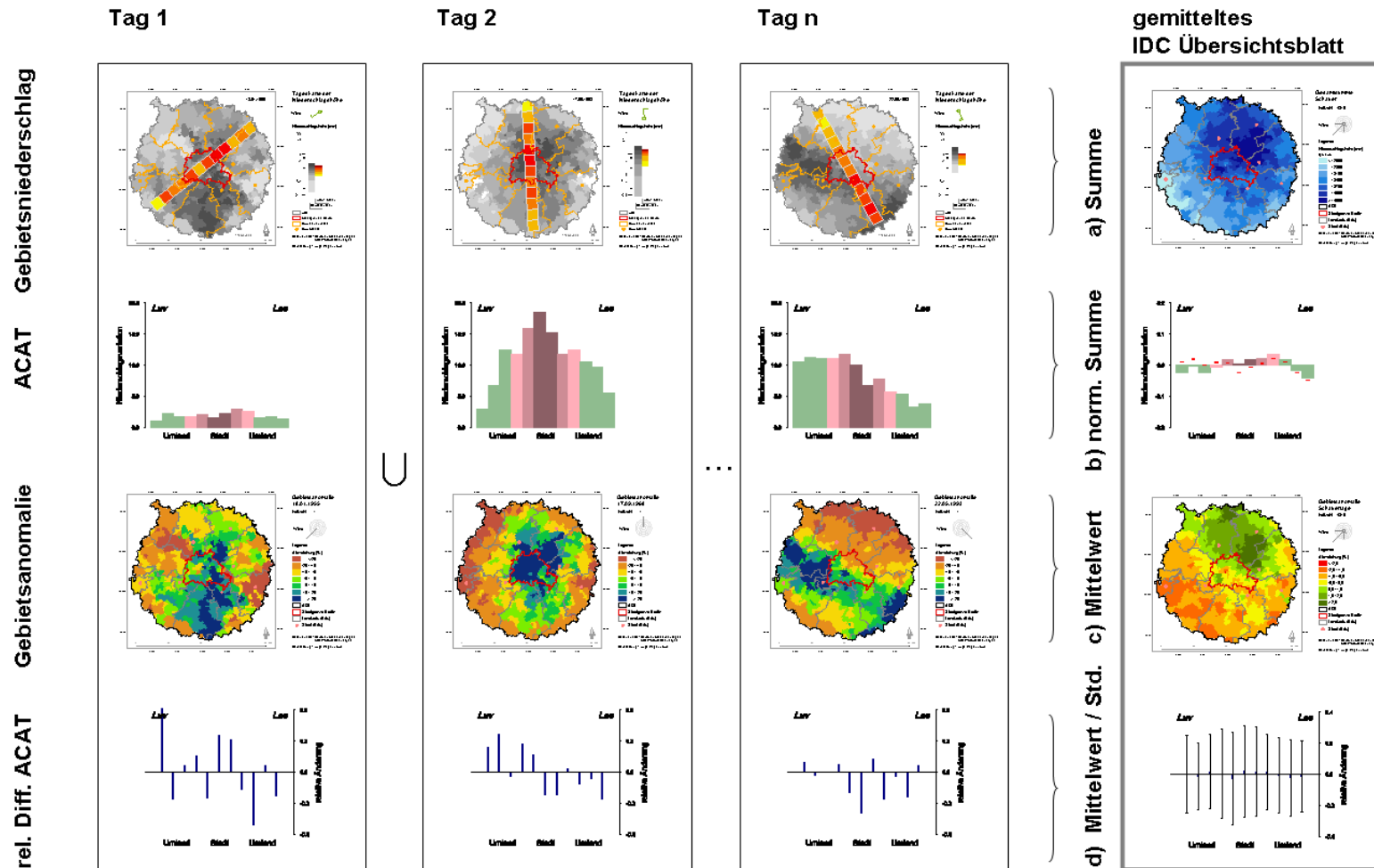


Abbildung 4-1: Mittelung der Übersichtsblätter einer Implemented Data Collection (IDC) aus Tagesdaten am Beispiel: Schauertage (W=8 und 9 an der Station Berlin-Tempelhof)

Name: **alle Niederschlagstage**

Beschreibung: umfasst alle Niederschlagstage im Untersuchungszeitraum 1951-2000

Fallzahl: 11848 mittlere Gesamtsumme: 27656 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 100 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,3 mm

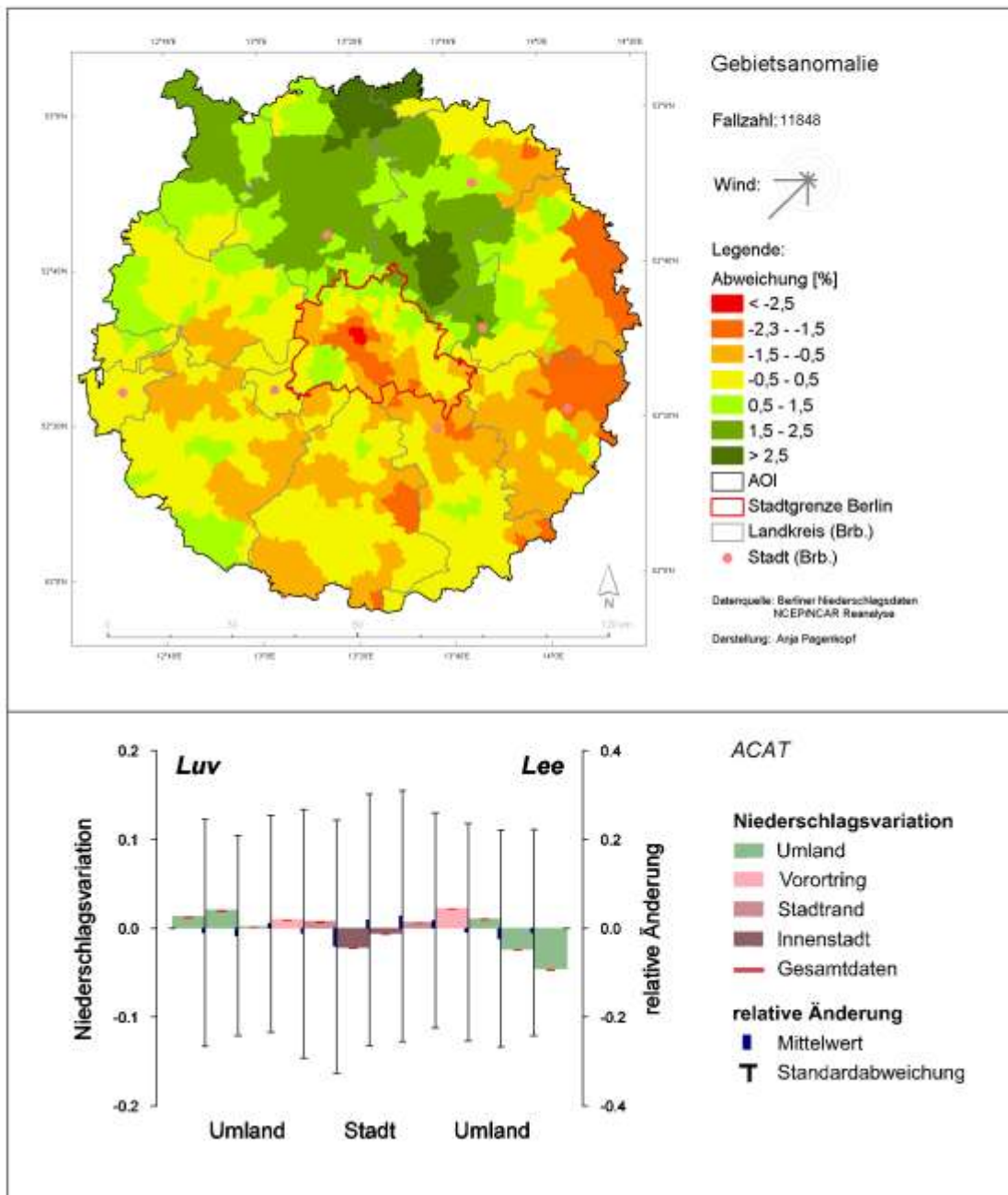


Abbildung 4-2: Übersichtsblatt der IDC über alle Niederschlagstage

4.1 Einfaktorielles Experiment: Niederschlagstyp

Hypothese: Der modifizierende Einfluss eines Stadtkörpers wirkt sich verschiedenartig auf advektive und konvektive Niederschlagsbildung aus und verursacht qualitativ unterscheidbare räumliche Verteilungen.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 1.

Es werden die Niederschlagsverteilungen für IDC mit Advektions- und Konvektionsbewölkung dargestellt und anschließend mit denen der Advektions- sowie Konvektionsniederschläge, Regen und Schauer, verglichen. Aufgrund des Klassifizierungsvorgehens ist zu beachten, dass es sich bei den Tagen mit Konvektionsniederschlägen nicht um eine Untermenge der Tage mit Niederschlag und dominierend Konvektionswolken handelt, wie zu erwarten wäre. Ebenso sind die Tage der Advektionsniederschläge nicht voll deckungsgleich mit allen Tagen, die Advektionswolken und Niederschlag aufweisen. Dennoch sind die Verteilungen für Schauer und Konvektionsbewölkung sehr ähnlich. Unter konvektiven Bedingungen befindet sich eine isolierte Zone mit positiven Werten über der nördlichen Hälfte Berlins, die sich nach Norden bis zum Rand des Untersuchungsgebietes erstreckt (siehe Abbildung 4-3). Nicht nur im Osten und Süden, sondern auch im Westen des Untersuchungsgebietes sind die Niederschläge geringer als das Gebietsmittel. Im ACAT wird jeweils ein Niederschlagsmaximum über der Stadt und dem angrenzenden Leebereich deutlich. Da die dominierenden Windrichtungen Südwest, West und Süd sind, ist das Leemaximum wahrscheinlich weiterhin durch den orographischen Einfluss des Barnims verstärkt. Ein kleinräumiges innerstädtisches Minimum führt nur zu einem kleinen Einknicken der ACAT-Kurve auf positivem Niveau.

Im Gegensatz dazu tritt bei advektiver Bewölkung beziehungsweise bei Regen eine sehr deutliche negative Anomalie im Stadtgebiet zutage. Eine Zone positiver Abweichungen befindet sich ausgehend von der Stadt in nördlicher und westlicher Richtung am Rand des Untersuchungsgebietes (siehe Abbildung 4-4). An der Ostgrenze sind die geringsten Werte verzeichnet. Diese Anordnung kann als Übergang vom maritimen zum kontinentaleren Klima interpretiert werden, da hauptsächlich aus westlichen Richtungen die wasserdampfreichen Luftmassen vom Atlantik in das Untersuchungsgebiet transportiert werden. Damit entsteht bei überwiegend westlichen bis südlichen Winden im ACAT ein primäres Maximum weit vor der Stadt und ein schwaches sekundäres Maximum in Lee.

Zusammengefasst ergibt sich ein Hinweis auf eine Verstärkung der Niederschläge im Leebereich der Stadt insbesondere unter Konvektionsverhältnissen. Bei advektiver Niederschlagsbildung dominiert jedoch die übergeordnete räumliche Niederschlagsstruktur, die eine Verringerung der Niederschläge im Berliner Stadtgebiet aufweist.

Name: **Konvektionsniederschläge (Schauertage)**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern an der Station Berlin-Tempelhof

Fallzahl: 4815 mittlere Gesamtsumme: 13375 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 41 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,8 mm

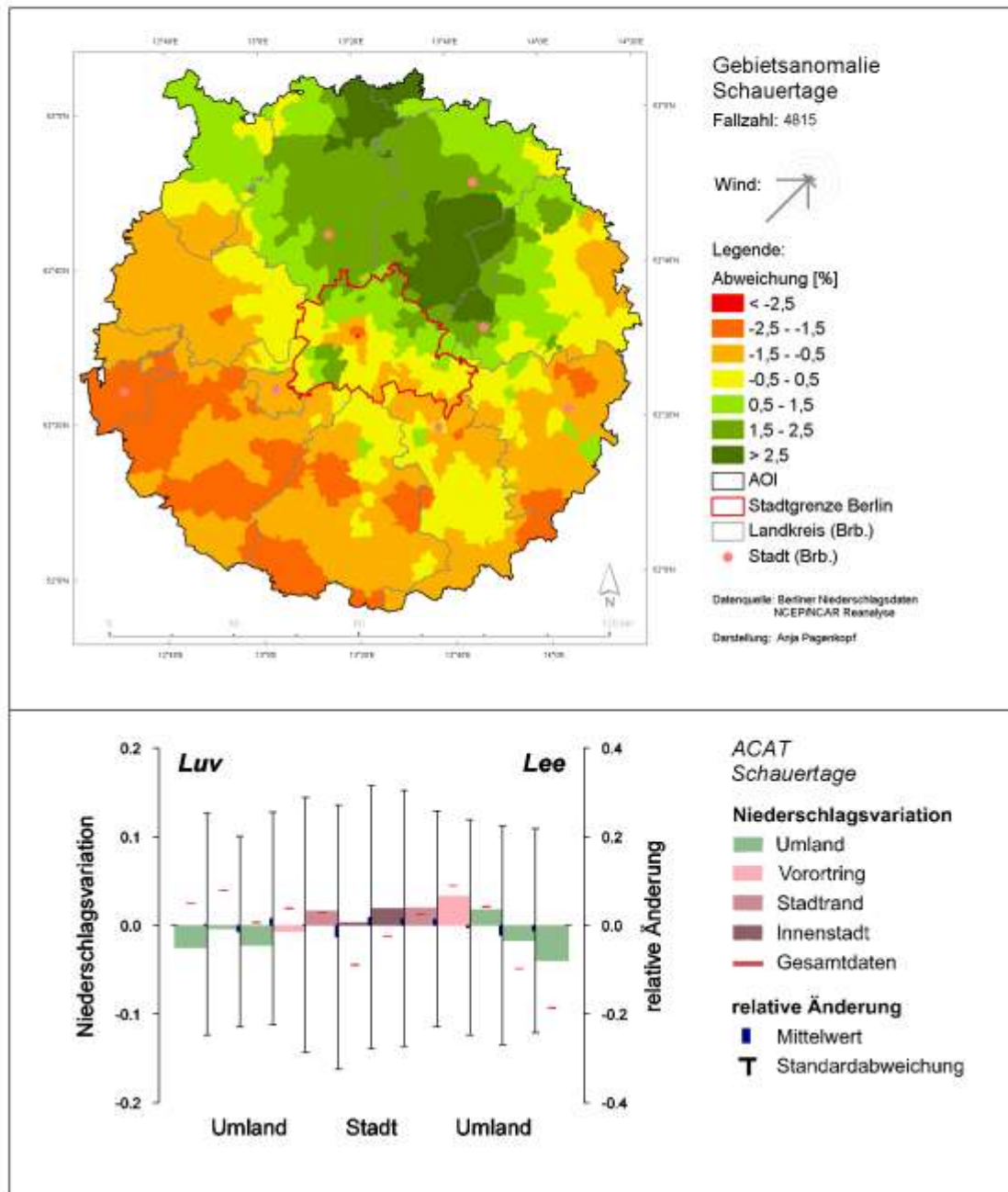


Abbildung 4-3: Übersichtsblatt der IDC Konvektionsniederschlagstage

Name: **Advektionsniederschläge (Regentage)**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen, Sprühregen oder Schnee an der Station Berlin-Tempelhof

Fallzahl: 7033 mittlere Gesamtsumme: 14280 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 59 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,0 mm

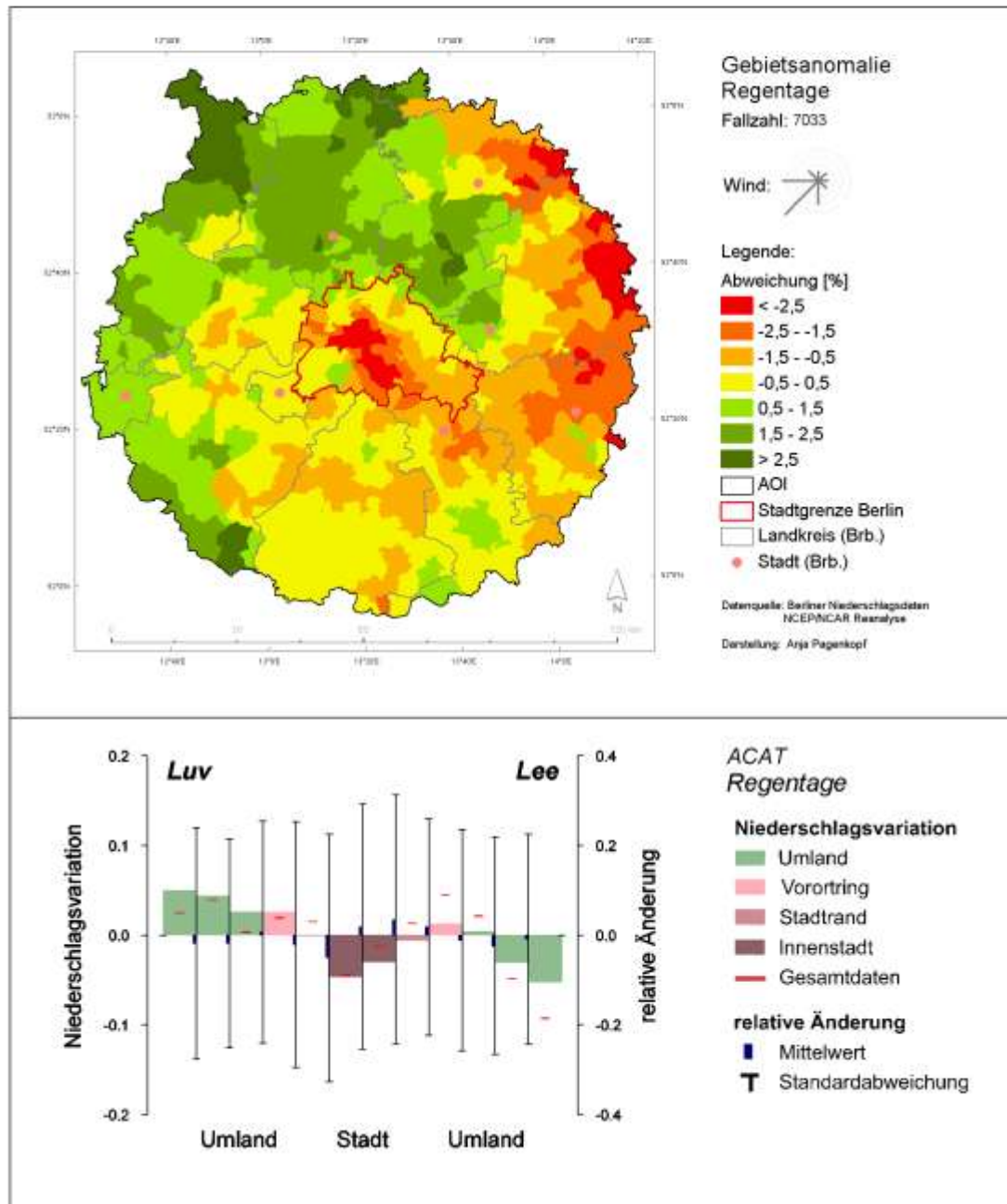


Abbildung 4-4: Übersichtsblatt der IDC Advektionsniederschlagstage

4.2 Einfaktorielles Experiment: Reproduzierbarkeit am Beispiel Niederschlagstyp

Hypothese: Die charakteristische räumliche Anordnung für Schauer- und Regentage gilt auch für Teilmengen des verwendeten Datenensembles.

Mit Hilfe der Unterscheidung nach Regentagen und Schauertagen, beobachtet an der Wetterstation Berlin-Tempelhof, soll überprüft werden, wie gut die Reproduzierbarkeit der charakteristischen räumlichen Niederschlagsverteilung ist. Um die Ähnlichkeit der Datensätze zu bestimmen, wird der Pearson Korrelationskoeffizient berechnet. Der erklärte gemeinsame Anteil der Varianz für Schauer- und Regentage weist ein Bestimmtheitsmaß (r^2) von 0,21 auf. In 79 Prozent der Varianz unterscheiden sich die beiden Niederschlagsverteilungen (siehe Abbildung 4-5).

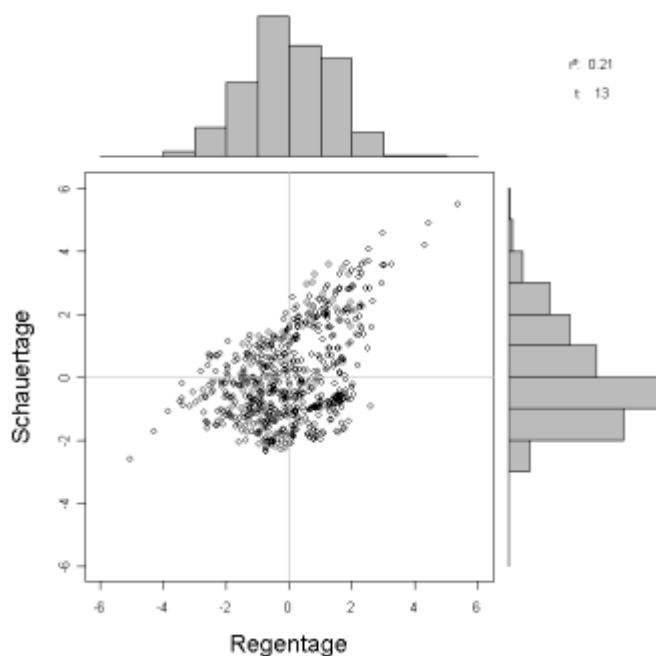


Abbildung 4-5: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie für alle Teilgebiete an Regen- und Schauertagen

Für eine zufällige Zuordnung der Niederschlagstage zu Teilmengen der Schauer- und Regentage wurden alle Niederschlagstage mit einer Zufallszahl zwischen 1 und 10 versehen. Anschließend wurden kleiner werdende Teilmengen nach den Werten der Zufallszahl zusammengestellt. Es wurden zum Beispiel die Schauertage mit den Zufallszahlen >6 extrahiert. Daraus ergibt sich eine Teilmenge, die zirka 40 Prozent des der Schauertage umfasst. Es wurden je zwei Teildatensätze für 80, 60, 40 und 20 Prozent der Werte des Bezugsdatensatzes zusammengestellt. Für die Teilmengengröße von zehn Prozent wurden für Schauer- und Regentage je vier Teildatensätze entnommen, weil die Variabilität höher wurde. Die aus den Teilmengen resultierenden räumlichen Verteilungen der prozentualen Gebietsanomalien wurden visuell und über das Bestimmtheitsmaß miteinander verglichen.

Die Niederschlagsverteilung stimmt sowohl für Regentage als auch für Schauertage für alle Teildatensätze gut überein, die mindestens 20 Prozent der jeweiligen Gesamtstichprobe umfassen. Verringert man die eingehende Fallzahl auf zirka 10 Prozent, so ergeben sich Abweichungen von der typischen Anordnung der Zonen positiver und negativer Gebietsanomalie. Damit ergibt sich für eine Fallzahl ab 1000 eine gute Reproduzierbarkeit der Niederschlagsstruktur für die Einteilung nach dem Niederschlagstyp. Es ist zu erwarten, dass für eine repräsentative Darstellung der typischen Niederschlagsverhältnisse, die durch mehr beziehungsweise stärker untergliederte Faktoren genauer beschrieben werden, eine geringere Fallzahl notwendig ist.

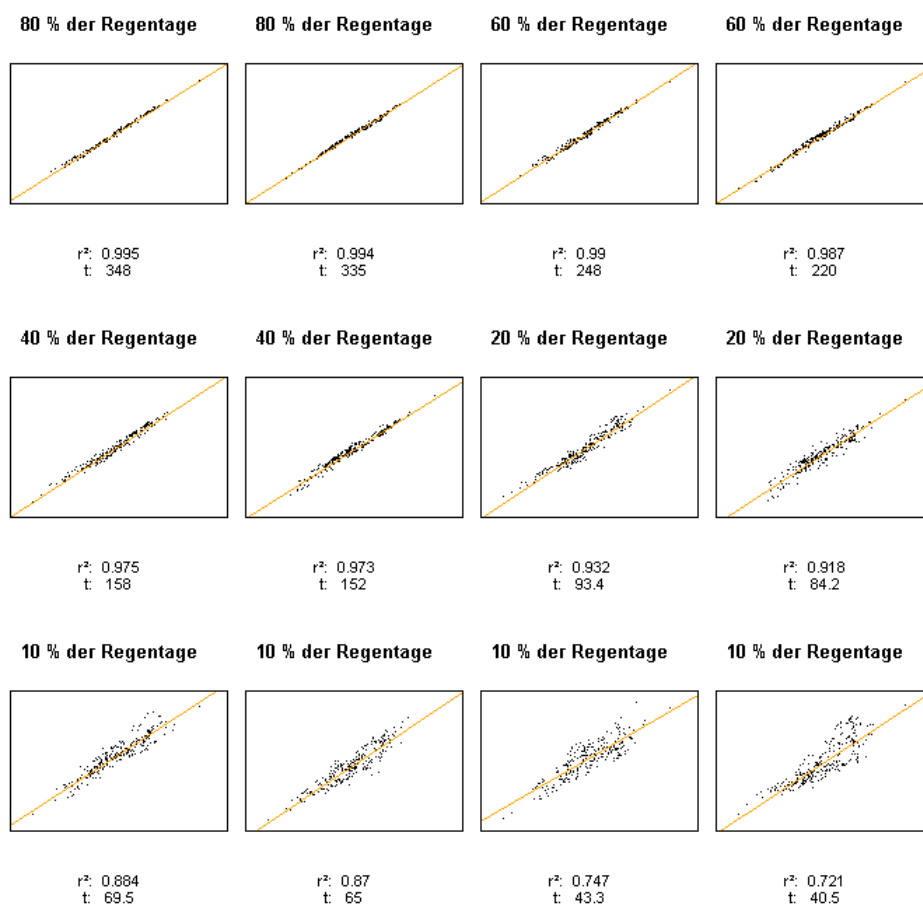


Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der Teilmengen von Regentagen (y-Achse) zu allen Regentagen (x-Achse) in Form mittlerer relativer Gebietsanomaliewerte der Teilgebiete

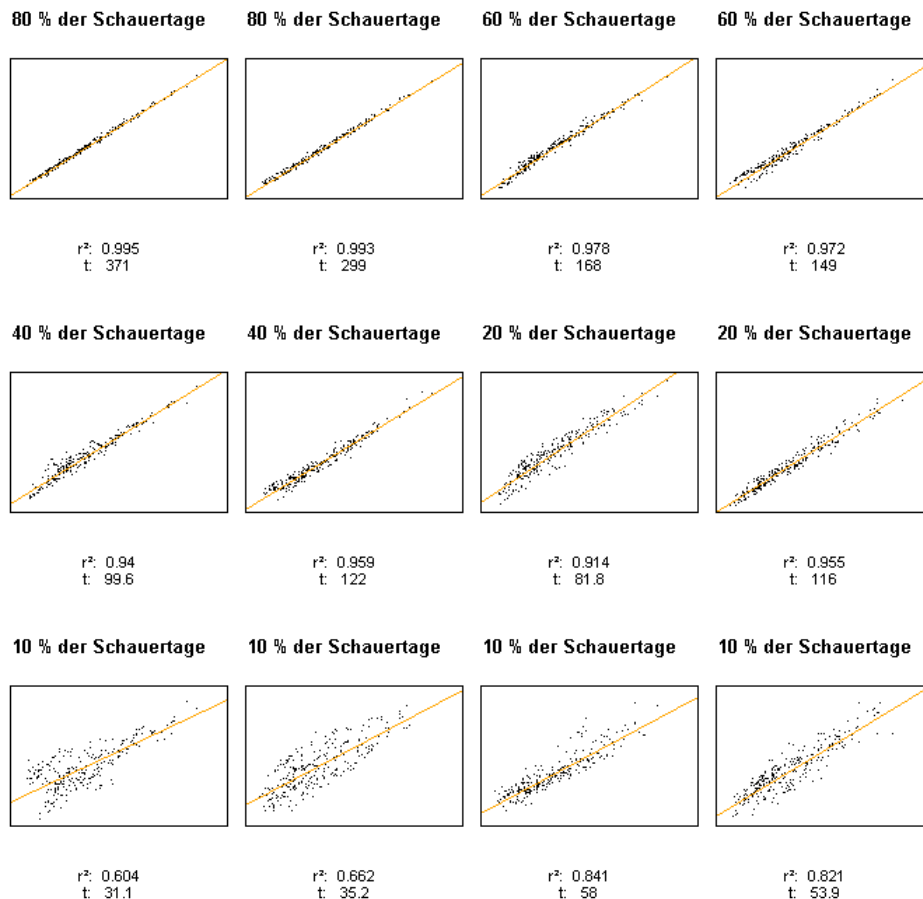


Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der Teilmengen von Schauertagen (y-Achse) zu allen Schauertagen (x-Achse) in Form mittlerer relativer Gebietsanomaliewerte der Teilgebiete

Mit dem Pearson Korrelationskoeffizient (r) wird die Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Datensätzen bestimmt. Eine Überprüfung der Zufälligkeit des Zusammenhangs erfolgt über den t-Test. Die allgemeine Nullhypothese lautet: die Verteilungen sind gleich und die Alternativhypothese: die Verteilungen sind unterschiedlich. Für den Vergleich der räumlichen Niederschlagsverteilungen werden die Gebietsniederschläge der Teilgebiete im Untersuchungsgebiet verwendet. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Niederschlagsstrukturen und bedingt durch das Interpolationsverfahren sind diese Werte nicht unabhängig voneinander. Die Freiheitsgrade können deshalb nicht festgelegt werden. Allerdings ist der Einfluss der Freiheitsgrade auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten relativ gering. Selbst bei Reduktion auf 15 Freiheitsgrade weichen die Irrtumswahrscheinlichkeiten nicht deutlich voneinander ab. Die Irrtumswahrscheinlichkeit steigt erst auf Beträge um 0,1, wenn sich die Testvariable t auf Beträge kleiner 1,5 verringert. Die Testvariable t nimmt durch die hohe Fallzahl, aus 636 Teilgebieten, fast immer so hohe Werte an, dass hoch signifikante Ergebnisse ausgewiesen werden. Damit eine gewisse Unterscheidung der Aussagesicherheit erfolgen kann, wird deshalb im Folgenden die Testvariable t anstelle der Irrtumswahrscheinlichkeit angegeben.

In der Abbildung 4-6 und der Abbildung 4-7 sind Streudiagramme dargestellt, in denen die zufällig zusammengesetzten Teilmengen der Gesamtstichprobe gegenüber gestellt werden. Je kleiner die Teilmengen werden, umso stärker streuen die Punktwolken. Bis zu einer Reduktion auf 20 Prozent liegt das Bestimmtheitsmaß aber über 0,9. Verringert man die verwendeten Daten auf 10 Prozent des Ausgangsdatensatzes liegt das Bestimmtheitsmaß unter 0,9 und der Wert der Testvariable t nimmt deutlich ab. Für Schauertage ist die Variabilität beim 10 Prozent Level etwas höher als bei Regentagen, was mit Bezug auf die Niederschlagsgenese plausibel ist. Die Hypothese, dass die Niederschlagsverteilungen der Teilmengen der Verteilung über alle Tage des jeweiligen Niederschlagstyps gleichgesetzt werden kann, wird bis zur Verringerung des Datenumfangs auf 20 Prozent angenommen.

4.3 Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit

Hypothese: Lokal bestimmte Konvektion ist deutlich häufiger im Sommer als im Winter. Darum weist die Niederschlagsverteilung durch Schauerereignisse im Sommer eine stärker ausgeprägte urbane Leeanomalie auf als im Winter. Für die Regenereignisse, die aus einem überregionalen Prozess resultieren, ist keine jahreszeitliche Modifikation zu erwarten.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 3.

Für den Sommer (Juni, Juli, August) und Winter (November, Dezember, Januar) sind in dem fünfzig-jährigen Berliner Niederschlagsdatensatz jeweils rund 3000 Niederschlagstage erfasst. Während im Sommer an fast zwei Drittel der Tage Schauer und an einem knappen Drittel Regen beobachtet wurden, wurden nur für ein Viertel der Wintertage mit Niederschlag Schauer aufgezeichnet. Basierend auf der Interpretation der mittleren relativen Gebietsanomalie werden in den drei Sommermonaten kaum räumliche Unterschiede für die Tage mit Schauerbeobachtungen festgestellt. Sie liegen in einem Schwankungsbereich von drei Prozent der Niederschlagshöhe. Der zugehörige ACAT gibt diesen Umstand mit minimalen Abweichungen vom ACAT Mittelwert wieder, die nicht eindeutig zu interpretieren sind. Im Winter zeichnet sich über den klimatologischen Zeitraum eine ausgeprägte Zone höherer Niederschläge in Lee bezogen auf die drei häufigsten Windrichtungen von West, Südwest und Süd ab. Diese Verteilung weist kein städtisches Minimum in Berlin auf. Damit wäre die Hypothese: „Im Sommer ist die Auswirkung der Stadt auf Konvektionsniederschläge besonders stark“ widerlegt. Bei lokal ausgelösten Schauern, wie sie fast ausschließlich im Sommer zufällig und kleinräumig auftreten, gleichen sich die Niederschlagsgebiete gegenseitig aus. Auch die Summe der absoluten Niederschlagshöhen im Sommer ergibt keine strukturiertere räumliche Verteilung. Die Ähnlichkeit der Niederschlagsverteilung der Winterschauer zu der allgemeinen Schauerverteilung liegt mit 0,82 über der Ähnlichkeit der Sommerschauer bezogen auf die Schauerverteilung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,51.

Die städtische Wärmeinsel, die besonders zur Konvektionsverstärkung beitragen kann, ist ein Sommerphänomen (vgl. Kuttler, 1993: S. 128). Darum wird das vorliegende Ergebnis im nächsten Kapitel überprüft, indem die Niederschlagsverteilung für Tage mit einer ausgebildeten städtischen Wärmeinsel derjenigen ohne Wärmeinsel gegenübergestellt wird.

Die sommerliche Regenverteilung unterscheidet sich nicht auffällig von der Gesamtregenverteilung für Regentage. Es ergibt sich das Maximum am nördlichen und westlichen Rand des Untersuchungsgebietes. Die geringsten Werte liegen im Osten. Die großräumige Anordnung weist keinerlei offensichtliche Modifizierung durch die Stadt auf. So ist im ACAT Verlauf nur die Abnahme von West nach Ost erkennbar. Es fehlt im Sommer das Stadtminimum, das bei Regentagen im Winter besonders deutlich hervortritt. Außerdem weist das Gebiet im Nordosten Berlins im Winter ebenso hohe positive Anomalien auf wie im Nordwesten. Im Westen finden sich für diese Jahreszeit im Vergleich mit der Gesamtsituation keine positiven Werte. Dass die Regenabschwächung in der Stadt im Winter stärker als im Sommer ist, könnte ein Indiz für die intensivere Auswirkung der Winterbedingungen auch auf die Regenniederschläge sein. Allgemein ist die Regenverteilung auch stärker durch die Winterereignisse geprägt mit $r^2=0,88$ zu $r^2=0,69$ im Sommer.

Die typischen klimatologischen und meteorologischen Rahmenbedingungen im Winter haben einen dominierenden Einfluss auf die allgemeine Niederschlagsverteilung für konvektive Niederschläge, Schauer, im Untersuchungsgebiet. Die erwartete urbane Verstärkung von Schauerniederschlägen im Sommer konnte nicht ermittelt werden, Die Leeanomalie ist im Winter dafür umso auffälliger. Im Winter ist ebenfalls eine deutliche urbane Modifikation auch der Regenereignisse erkennbar, wobei es sich um eine innerstädtische Verminderung der Niederschläge handelt.

4.4 Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, städtische Wärmeinsel

Hypothese: Bei Feststellung einer städtischen Wärmeinsel als positiver Temperaturdifferenz zwischen Berlin und dem Untersuchungsgebiet ist eine Intensivierung von Schauern über der Stadt zu erwarten.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 4.

Die Schauer- und Regenniederschläge werden in diesem Experiment für Tage mit und ohne städtische Wärmeinsel (UHI) betrachtet. In der Abbildung 4-8 ist die Anordnung der mittleren Jahrestemperatur der Reanalysedaten über den 50-jährigen Untersuchungszeitraum eingetragen. Innerhalb des Untersuchungsgebietes weist sie eine sehr regelmäßige Zunahme von Nordost nach Südwest auf. Berlin liegt zwischen den 8,4 °C und 8,6 °C Isothermen. Für den gleichen Zeitraum wurde an der Station Berlin-Tempelhof jedoch ein durchschnittlicher Jahresmittelwert von 9,4 °C gemessen. Damit ist bereits ein Indiz gegeben, dass die Stadt wärmer ist als aus dem großräumigen Mittel des Modells zu erwarten.

Im Verlauf der fünfzig Jahre ergeben sich doppelt so viele Tage mit höheren Tagesmitteltemperaturen in Berlin-Tempelhof als durch den Gebietsmittelwert der Reanalysedaten angezeigt wird.

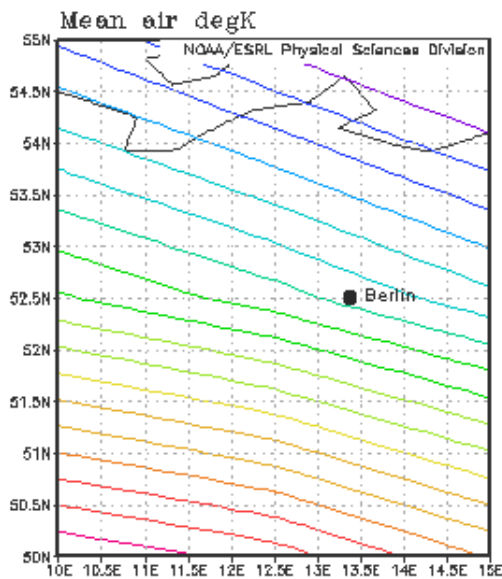


Abbildung 4-8: Verteilung der mittleren Lufttemperatur über dem Osten Deutschlands aus den Daten des Gebietsausschnittes zwischen 10° und 15° ö.L. sowie 50° und 55° n.B. [$\Delta T = 1$ Kelvin, $T_{min} = 7,9$ °C im Nordosten (lila), $T_{max} = 9,7$ °C im Südwesten (pink)](zur Verfügung gestellt von NOAA-ESRL Physical Sciences Division auf der Webseite <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>)

Die Unterteilung der Konvektionsniederschläge nach Tagen mit und ohne städtische Wärmeinsel weist nur geringfügige Unterschiede zur mittleren Verteilung der Schauer auf. Es befindet sich das ausgeprägte Maximum im Norden und Nordosten der Stadt und eine ausgedehnte Minimumzone im Südwesten und Süden. Für die Schauertage mit Wärmeinsel ist im ACAT ein schwach ausgeprägtes urbanes Maximum erfasst. Trotz der vergleichbar deutlichen räumlichen Strukturen für die Schauertage ohne Wärmeinsel sieht man im ACAT nur eine geringfügige Leezunahme. Die städtische Wärmeinsel, in der Weise wie sie hier bestimmt wurde, hat auf die Schauerbildung keinen klar räumlich differenzierenden Einfluss. Das Bestimmtheitsmaß r^2 zur räumlichen Verteilung aller Schauertage beträgt jeweils über 0,9. Die erwartete Intensivierung der Leeanomalie durch die Ausbildung einer UHI deutet sich als Stadtmaximum an, kann aber nicht eindeutig bestätigt werden.

Für die Tage mit Regen fördert die Einteilung nach der Wärmeinselausprägung einen Unterschied der Niederschlagsverteilung zu Tage. Mit Wärmeinsel ist die Verteilung des Regens den Schauerniederschlägen sehr ähnlich, allerdings mit einem innerstädtischen Minimum. Diese Verteilung entspricht stärker der Schauerverteilung, $r^2 \sim 0,5$, als der Regenverteilung, $r^2 \sim 0,1$. Ohne Wärmeinsel liegt die ausgedehnte Maximumzone am Westrand des Untersuchungsgebietes und das Stadtminimum ist sehr dominant. Diese Gegenüberstellungen lassen den Schluss zu, dass Regen im Stadtgebiet allgemein abgeschwächt wird, bei Vorhandensein von höheren Temperaturen in der Stadt aber gleichzeitig wie-

der verstärkt wird, so dass sich im Leebereich ein Maximum herausbildet. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Wärmeinsel bei der Regenbildung einen labilisierenden Effekt hat und so schauerartig verstärkte Niederschläge auftreten.

Die Unterscheidung der Schauer- und Regenereignisse nach der Ausprägung einer UHI ergab nicht das erwartete Ergebnis. Eine mögliche Verstärkung von sich kleinräumig entwickelnden Schauern durch den zusätzlichen sensiblen Wärmestrom in Berlin, andere städtische Einflussfaktoren nicht berücksichtigt, spiegelt sich nicht in den räumlichen Niederschlagsstrukturen wider. Für Regen aus großräumigen Niederschlagssystemen indessen verschiebt sich an Tagen mit UHI der Niederschlagsschwerpunkt von seiner häufigsten Lage am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets in den Leebereich der Stadt. Für beide Bedingungen weist der Regenniederschlag dabei eine Abschwächung im Stadtgebiet auf.

4.5 Dreifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit, städtische Wärmeinsel

Hypothese: Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Jahreszeiten lassen einen stärkeren urbanen Einfluss auf die Niederschlagsverteilung sichtbar werden als die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 5.

Die Einteilung nach Jahreszeiten hat eine stärkere Unterscheidung der Schauertage hervorgerufen, die Einteilung nach dem Auftreten der Wärmeinsel einen geringere. Bei den Regentagen ist es genau umgekehrt, denn zwischen Sommer und Winter gibt es kaum Unterschiede. Die Unterschiede sind dagegen mit und ohne UHI umso ausgeprägter. Es soll nun überprüft werden, welcher Faktor eine größere Bedeutung hat, beziehungsweise bei welchen Rahmenbedingungen sich Stadteinflüsse auf konvektive und advektive Niederschläge stärker durchsetzen können. Dazu werden die drei Faktoren in der Klassenbildung kombiniert und deren Ergebnisse dargestellt.

Über den Untersuchungszeitraum verhält sich die Häufigkeit von Niederschlagstagen mit Wärmeinsel zu denen ohne Wärmeinsel etwa wie 1:2. Im Sommer gibt es fast sechsmal mehr Tage mit Wärmeinsel als ohne, während im Winter die Anzahl der Tage mit und ohne Wärmeinsel die gleiche Größenordnung haben. Für Schauer im Sommer ist das Verhältnis noch größer. Es gibt rund 1500 Tage mit Schauern und Wärmeinsel und nur knapp 200 ohne Wärmeinsel. Sommerschauer mit Wärmeinsel sind damit quasi identisch mit den Sommerschauern im Allgemeinen. Damit ist keine besonders ausgeprägte urbane Verstärkung der Schauer im Sommer durch die städtische Wärmeinsel zu erkennen. Ohne Wärmeinsel hingegen wird ein Stadtminimum deutlich, das von höheren Werten in allen Himmelsrichtungen eingeschlossen ist. Ein vergleichbares Bild ergibt sich für die Sommerregen ohne Wärmeinsel, dem jedoch ein großräumiger, abnehmender SW-NO-Trend überlagert ist. Für die knapp 1000 Tage mit Sommerregen und Wärmeinsel tritt bei der großräumiger Niederschlagsabnahme von Nordwest

nach Ost ein städtisches Maximum auf. Es lässt sich zusammenfassen, dass sich ohne die städtische Wärmeinsel im Sommer an Regentagen und auch für Schauertage ein dominantes innerstädtisches Minimum entwickelt. Die Niederschlagszunahme über der Stadt ist für Regentage im Sommer stärker bei Auftreten einer UHI als im Durchschnitt aller Tage. Deren Einfluss ist im ACAT aber nicht über das Stadtgebiet hinaus feststellbar. Für Sommerschauer gibt es keine Intensivierung durch die UHI.

Die typische Anordnung der Schauerniederschläge im Winter dominiert die Verteilung mit und ohne Wärmeinsel. Es zeigt sich jeweils ein markantes Maximum über der Stadt und im nordöstlich angrenzenden Umland. Für Regenniederschläge im Winter ist die Bedeutung der Wärmeinsel für die räumliche Differenzierung größer als die Bedeutung der Jahreszeit. Die Wärmeinselwirkung hat im Winter eine ebenso deutliche Auswirkung auf den Regen wie im Sommer. Die Maximumzone beschränkt sich dabei aber auf den Leebereich der Stadt. Das offensichtliche Stadtminimum ist den Regentagen mit und ohne UHI gemeinsam. An den Tagen ohne Wärmeinsel liegt das Niederschlagsmaximum am südwestlich-westlichen Rand der Stadt auf der Luvseite des Untersuchungsgebietes. Winterschauer und Winterregen mit städtischer Wärmeinsel haben einen positiven Schwerpunkt im Norden und Osten Berlins als Leeanomalie. Für Winterregen bildet sich aber für beide Fälle ein Stadtminimum aus, dem ohne UHI im Westen ein Maximum voransteht.

In der Zusammenschau zeigt sich, dass die erklärenden Anteile der Faktorenkombination nicht eindeutig und gleichmäßig verteilt sind. Für Schauertage ist die Jahreszeit von größerem Gewicht als die Ausbildung der Wärmeinsel. Zumal durch die Wärmeinsel keine Unterschiede für Schauer aufgezeigt wird. Für Regenniederschläge ist es umgekehrt. Die Unterscheidung nach dem Auftreten einer städtischen Wärmeinsel ruft im Vergleich zur Jahreszeit die klarere Differenzierung hervor und spiegelt sich stärker in ihrer Kombination wieder (siehe Abbildung 4-9). Die Annahme, dass es im Sommer mehr Wärmeinseltage gibt, ist zwar richtig, doch geht davon kein stärkerer Einfluss auf die Schauer aus. Vielmehr scheinen die Rahmenbedingungen im Winter eine Schauerverstärkung durch das Stadtgebiet Berlins zu unterstützen, unabhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umgebung. Advective Niederschläge setzen sich aus den Verteilungen zusammen, die über die Einteilung nach Wärmeinselausprägung sichtbar werden. Wenn damit nicht unterschiedliche synoptische Rahmenbedingungen dargestellt werden, so ist hier die Modifikation durch die Wärmeinsel sehr relevant, unabhängig von der Jahreszeit. Es kommt zu einer Verschiebung des Niederschlagsschwerpunktes von der Luvseite für Tage ohne Wärmeinsel auf die Leeseite bei Tagen mit Wärmeinsel. Im Sommer zeigt sich sogar ein Maximum innerhalb des Stadtgebietes, wo sich sonst nur eine ausgedehnte Minimumzone bei Regen befindet. Diese Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, dass die Verringerung eines limitierenden Faktors durch den Stadteinfluss bei Niederschlagsbildung unter ungünstigen atmosphärischen Rahmenbedingungen eine in der räumlichen Darstellung sichtbare niederschlagsverstärkende Wirkung hat. Im Sommer sind meist weiträumig gute Voraussetzungen für Konvektion vorhanden, so dass die

Wirkung der Stadt nicht so relevant ist. Im Winter und bei Regentagen hingegen ist schon der geringe zusätzliche Eintrag von Energie Auslöser für höhere Niederschläge im Einflussbereich von Berlin.

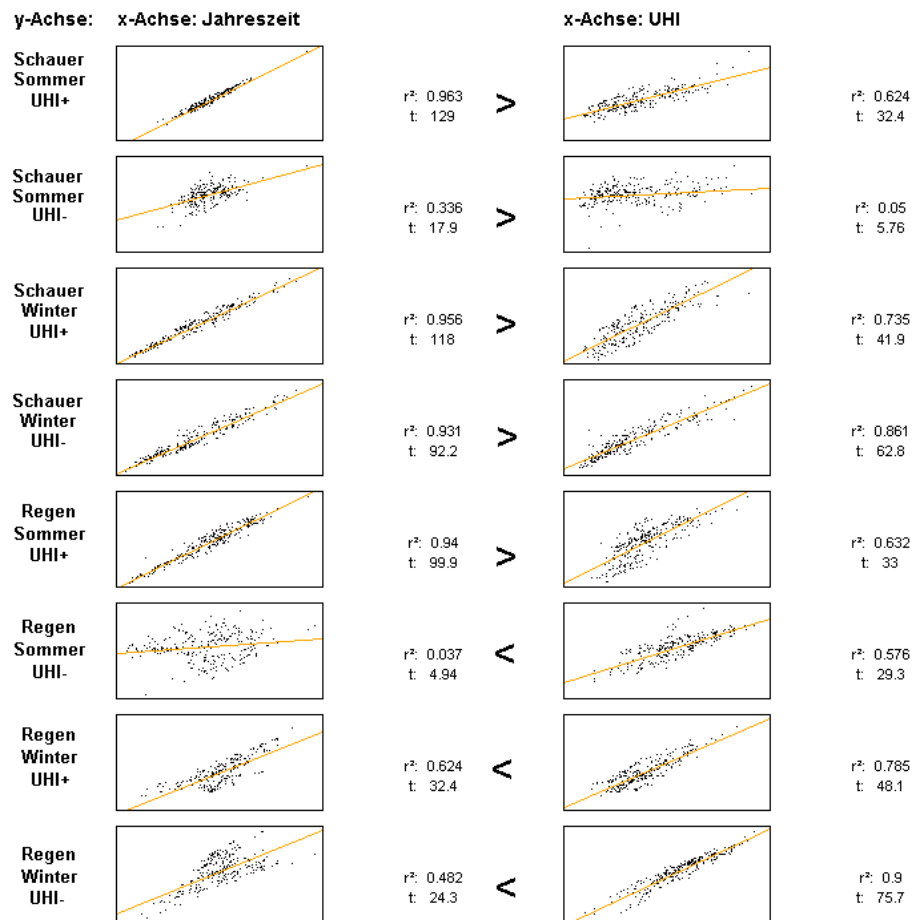


Abbildung 4-9: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie der Teilgebiete für die IDC aus der Dreifachfaktorkombination Niederschlagstyp-Jahreszeit-Wärmeinsel bezogen auf die mittlere relative Gebietsanomalie der IDC der jeweiligen Jahreszeit in der linken Spalte, und in der rechten Spalte bezogen auf die Ausprägung der Wärmeinsel (UHI)

4.6 Einfaktorielles Experiment: Niederschlagsintensität

Hypothese: An Tagen mit geringen Niederschlagsintensitäten wird der verstärkende Stadteffekt deutlicher sichtbar als an Tagen mit hohen Niederschlagsmengen.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 6.

Aufbauend auf der Feststellung, dass unter ungünstigeren Entstehungsbedingungen die stärkere Niederschlagszunahme durch den zusätzlichen Energieeintrag des Stadtkörpers zu erkennen ist, soll diese auf die Niederschlagsintensität übertragen werden. Bei schwachen und mäßigen Niederschlagsintensitäten ist eine Intensivierung zu erwarten. Bei starken Niederschlägen ist kaum noch mit einer Verstärkung zu rechnen, weil die Niederschlagsbildung bereits sehr intensiv abläuft. Vergleicht man die Niederschlagsverhältnisse für die fünf festgelegten Intensitätsstufen von Schwach- über Durchschnitts-,

Stark-, Intensiv- und Extremniederschlagstage (siehe Tabelle 3-2), so ergibt sich indes ein abweichendes Bild. Die Schwachniederschlagstage, mit Niederschlagshöhen unter 1,5 mm, weisen eine ausge dehnte u-förmige Maximumzone von Norden über Westen nach Süden um ein sich im Stadtgebiet befindendes Minimum auf. Im ACAT Verlauf zeigen sich ebenfalls negative Abweichungen in der Innenstadt, aber positive im Stadtrand, besonders im Vorortring. Die Karte der Durchschnittsniederschlagstage sieht der Karte der mittleren Verteilung für den Untersuchungszeitraum sehr ähnlich. Der abnehmende West-Ost-Trend ist nicht mehr so hervorstechend wie bei den Schwachniederschlagstagen. Auch der Gegensatz zwischen dem Innenstadtminimum und dem Stadtrand/Vorort-Maximum ist im ACAT nicht so auffällig. Für Intensivniederschlagstage, mit Niederschlagshöhen zwischen 10 und 30 mm, ist keine ausgeprägte räumliche Differenzierung im Untersuchungsgebiet festzustellen. Der Wertebereich erstreckt sich lediglich zwischen plus/minus 1,5 Prozent der Niederschlagshöhe. Die vergleichsweise geringen Unterschiede weisen aber im ACAT ein innerstädtisches Minimum mit einer schwachen Leezunahme auf.

Entgegen der Hypothese zeigt sich mit geringeren Niederschlagsintensitäten keine deutlichere Verstärkung sondern eine verringernde Wirkung im Stadtgebiet. Hingegen offenbart sich eine singuläre Maximumzone an den Starkniederschlagstagen mit der kleinen Fallzahl von 171 über der Stadt sowie dem östlichen und südöstlichen Umland (siehe Abbildung 4-10). Durch den Vergleich der Maximumzone im Nordosten bei Intensivniederschlagstagen mit sehr häufigen Südwestwinden und der Maximumzone im Osten bei Starkniederschlagstagen ohne die Dominanz der Südwestwinde wird wiederum deutlich, dass eine explizit windrichtungsabhängige Untersuchung von Leeanomalien notwendig ist. Berücksichtigt man den ACAT, so handelt es sich bei der Maximumzone der Starkniederschlagstage um eine positive Leeanomalie inklusive einer innerstädtischen Verstärkung. Für die Extremniederschlagstage gibt es einen abnehmenden Gradienten von Ost nach West. Die häufigste Windrichtung für diese besonderen Extremniederschlagstage ist mit 30 Prozent der Südostsektor. Die Verteilung der Südostwindsituation ist sehr prägnant für diese IDC. Bei dieser Windrichtung ist mit Niederschlägen durch Zyklonen auf der Vb Zugbahn (van Bebber) zu rechnen, die besonders warme und wasserdampfreiche Luft vom Mittelmeerraum gegen einen ausgeprägten Trog mit kalter Luft über Mitteleuropa führt. Dabei kommt es zu besonders effektiver Hebung mit hohem Umsatz der Luftfeuchtigkeit zu Niederschlag. Für die Intensivniederschlagstage befindet sich das Maximum der Niederschläge in räumlicher Überlappung mit dem urbanen Gebiet. Mit der Annahme, dass dieser Datensatz überwiegend von lokalen Niederschlagsereignissen geprägt ist, kann ein Erklärungsansatz eine Intensivierung unter Stadteinfluss sein. Es kann aber auch sein, dass die kleinräumigen konvektiven Intensivniederschläge durch die hohe Stationsdichte innerhalb Berlins besser erfasst werden als im Umland.

Name: **Starkniederschlagstage**

Beschreibung: Tage an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 30 mm und 50 mm liegt

Fallzahl: 171 mittlere Gesamtsumme: 2049 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 1,4 % mittlere Niederschlagshöhe: 12 mm

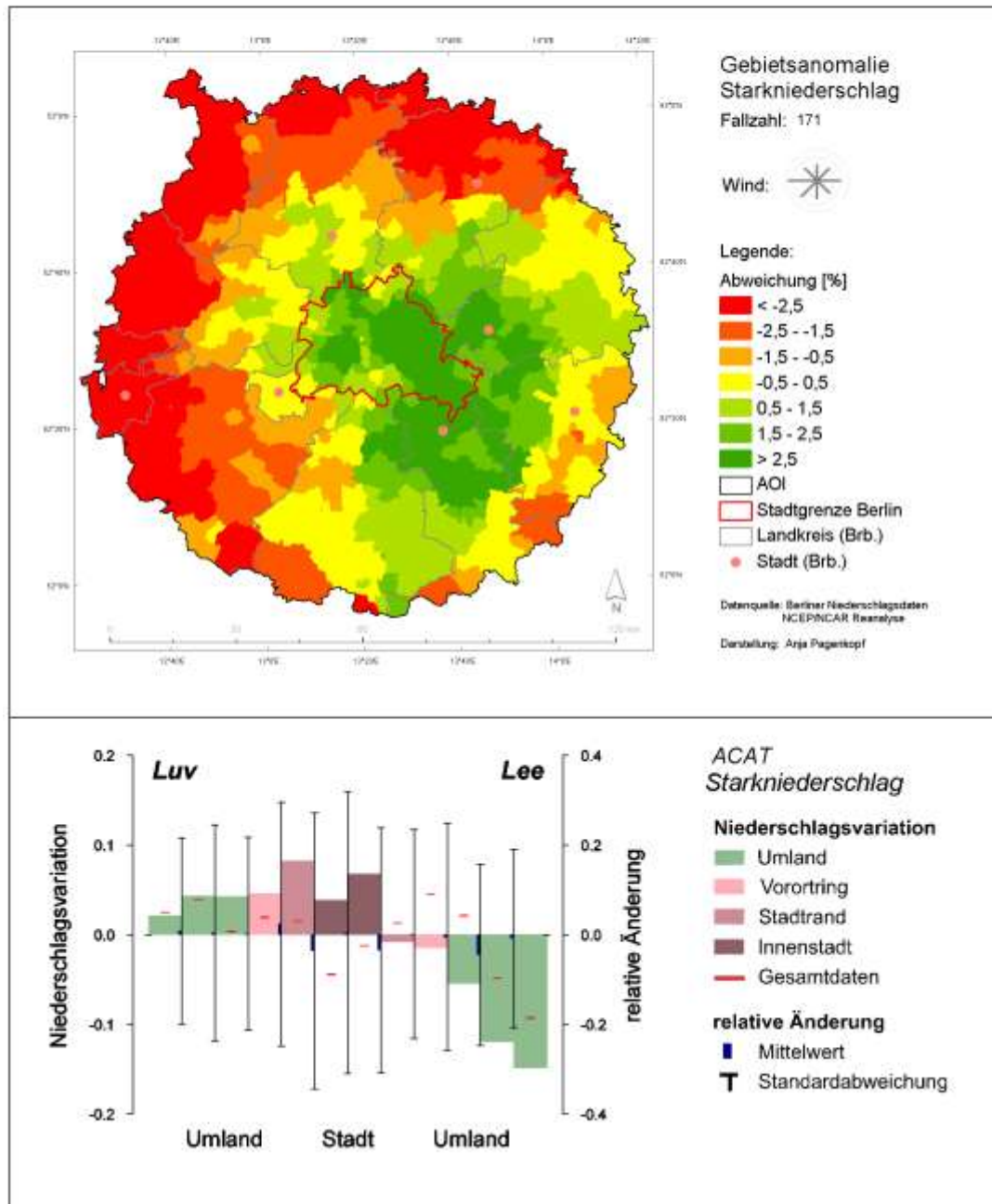


Abbildung 4-10: Übersichtsblatt der IDC Starkniederschlagstage

Die Überlegung, dass die Niederschlagsbildung bei Verfügbarkeit von Wasserdampf und vorhandener Hebungsbewegung durch die Stadt nicht mehr verstärkt werden kann, scheint widerlegt zu sein. Im Gegensatz wird deutlich, dass eine Verminderung von Niederschlägen in der Stadt vor allem durch Tage mit geringerer Intensität getragen wird.

Dazu beitragen könnte unter anderem die höhere Temperatur in Städten verbunden mit geringerer relativer Luftfeuchtigkeit, wodurch die kleinen Niederschlagstropfen vermehrt verdunsten. Einschränkend muss aber auch die Möglichkeit größerer Messungenauigkeiten bei geringeren Niederschlagsmengen in Betracht gezogen werden. Besonders die Messstandorte, die nicht der Qualitätssicherung des Deutschen Wetterdienstes unterliegen, könnten dafür anfällig sein. Eine differenzierte Untersuchung der Niederschlagsintensitätsklassen nach dem Niederschlagstyp wird im nächsten Kapitel angeschlossen.

4.7 Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

Hypothese: Der städtische Einfluss auf die Verteilung der beiden Niederschlagstypen ist unabhängig von der Niederschlagsmenge.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 7.

Das Verhältnis von Schauer- zu Regenbeobachtungen unterscheidet sich für die fünf klassifizierten Intensitätsstufen des Niederschlages. Bei geringen Niederschlagshöhen wurden an 21 Prozent der Tage Schauer beobachtet. Ihr Anteil nimmt kontinuierlich auf fast zwei Drittel der Starkniederschläge zu (siehe Abbildung 4-11). Es könnte daraus abgeleitet werden, dass die Unterschiede in den räumlichen Strukturen der Niederschlagsverteilung der Intensitätsstufen auf dem jeweils dominierenden Niederschlagstyp basieren. Deshalb wird diese Hypothese durch die der Kombination der beiden Einteilungen nach Niederschlagstyp und Niederschlagsintensität überprüft.

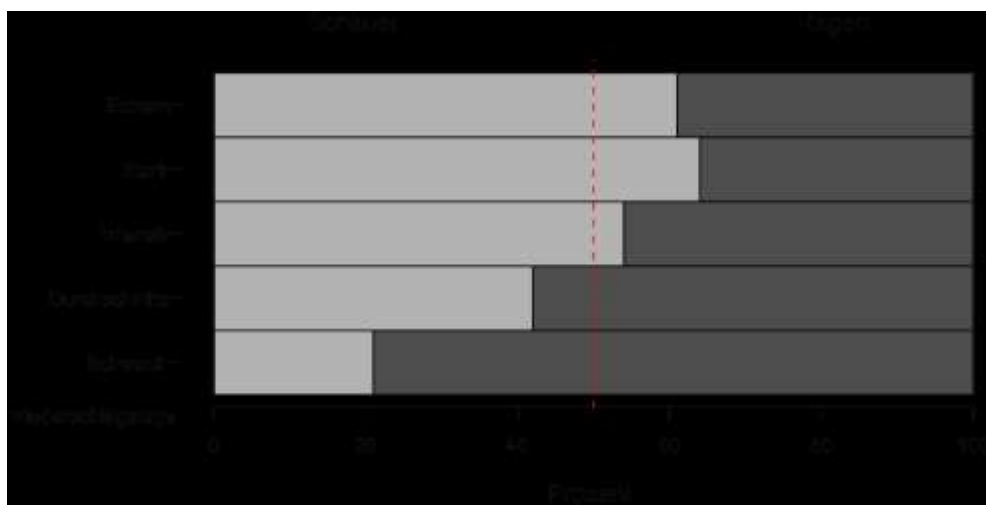


Abbildung 4-11: Anteilige Aufteilung der Schauer- und Regentage nach Intensitätsstufen

In der Verteilung der Schauer geringer Intensität zieht sich ein Streifen negativer Anomalie von West nach Ost durch die Mitte des Untersuchungsgebietes, das Berlin mit einschließt. Im ACAT wird die Abnahme im Stadtzentrum deutlich. Für die Intensitätsstufe mit geringen Niederschlagshöhen ist somit die oben bestimmte Verstärkung von Schauern über Berlin nicht festzustellen. In der umfangreichsten Gruppe mit der durchschnittlichen Niederschlagsintensität ist die Verteilung fast identisch mit der allgemeinen Schauergruppe, mit höheren Niederschlägen im Norden und Nordosten Berlins bis zur Grenze des Untersuchungsgebietes. Auch bei intensiven Schauern sind die Eigenschaften der Schauerniederschläge ausgeprägt sichtbar. Es fällt für diese Untergruppe der Intensivniederschlagstage ebenfalls die geringe Größe der Unterschiede auf. Es bestätigt sich, dass die Schauer im großen Maße die Verteilung der Starkniederschlagstage beeinflussen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass der konvektionsverstärkende Effekt der Stadt für alle Tage mit einer Niederschlagshöhe über 1,5 mm sehr deutlich ist und mit weiter zunehmender Niederschlagshöhe immer evidenter wird.

Für die IDC mit Regenbeobachtung in Berlin-Tempelhof mit geringen und durchschnittlichen Niederschlagshöhen, bis 10 mm, ergibt sich am Westrand des Untersuchungsgebietes eine Zone positiver Abweichung und am Ostrand eine solche mit negativen Abweichungen. Auffällig ist das städtische Minimum in der Kartendarstellung und dem ACAT. Damit ist die räumliche Struktur advektiver Niederschläge für diese beiden Intensitätsklassen gut zu erkennen. Das Minimum über Berlin bildet sich auch bei intensiven Regenfällen heraus, wobei nicht einmal die in der durchschnittlichen Niederschlagsverteilung sichtbaren Maxima über Grunewald, Tegeler Forst oder im Osten Berlins zu erkennen sind. Die Bereiche der positiven Abweichung liegen hierfür mehr im mittleren und südlichen Teil des Untersuchungsgebietes und der Bereich der negativen Abweichung im Norden. Die räumliche Verteilung der Gebietsanomalie für alle Regentage mit mehr als 30 mm entspricht nahezu der Verteilung aller Extremniederschlagstage mit mehr als 50 mm am Tag. Die beiden IDC überschneiden sich in weniger als der Hälfte der jeweils enthaltenen Tage. Hingegen weisen beide häufig Winde aus dem Südost- und Südsektor auf. Die offensichtliche Übereinstimmung mit der Südostwind-Verteilung bestätigen, dass außergewöhnliche, nicht konvektive Niederschlagshöhen im Untersuchungsgebiet an Zyklonen mit einer Vb Zugbahn gekoppelt sind.

Sowohl bei Schauern als auch Regen in der Gruppe der Niederschlagstage mit weniger als 1,5 mm ist das städtische Minimum stark ausgeprägt. Für Schauertage wird das Stadtminimum mit zunehmenden Tagessummen schwächer. Bei starken Intensitäten entwickelt sich an Schauertagen ein städtisches Maximum. Das Charakteristikum eines Stadtminimums für advektive Niederschläge ist für alle Intensitätsstufen vorhanden. Während für geringere Intensitäten die Verteilung dem Durchschnitt für advektive Niederschläge entspricht, werden die räumlichen Strukturen für die höheren Intensitätsstufen stärker durch besondere synoptische Zirkulationszustände geprägt. Die festgestellten Effekte der Stadt auf die zwei Niederschlagstypen sind nicht abhängig von der Intensität der Niederschläge. Die Unterschiede der Intensitätsstufen haben ihre Ursache nicht in dem jeweils häufigeren Niederschlags-

typ. Vielmehr spiegeln sie den dominierenden Einfluss der schwachen und durchschnittlichen Regentage, der starken Schauertage und außergewöhnlichen Niederschläge von Zyklonen auf der Vb Zugbahn wider.

4.8 Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

Hypothese: Mit zunehmender Windgeschwindigkeit verlagert sich der Bereich der urbanen Leeanomalie von einer Stadtzentrumsnähe weg in das Umland.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 8.

In der IDC der Schauertage beginnt eine Zone positiver Gebietsanomalie in den nördlichen und nordöstlichen Stadtteilen Berlins. Das Maximum dieses Bereiches manifestiert sich aber erst im Umland hinter der Stadtgrenze. Im Folgenden soll eine Lagebestimmung dieses Maximums in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit durchgeführt werden. Auffällig bei der Betrachtung von drei Windgeschwindigkeitsklassen sind die für diese Klassen deutlich verschiedenen Windrichtungsverteilungen. Schwacher Wind, mit Geschwindigkeiten unter vier Meter pro Sekunde, weht weitgehend gleichverteilt aus allen Himmelsrichtungen ohne einen klar überwiegenden Sektor. Die Windrichtungsverteilung bei mittleren Windgeschwindigkeiten entspricht der Häufigkeitsverteilung über alle Niederschlagstage. Für Tage mit starkem Wind, über neun Meter pro Sekunde, gibt es nur noch Wind aus dem Südwestquadranten mit West-, Südwest- und Südwind.

Bei schwachen Winden ergeben sich für die Schauertage nur minimale räumliche Unterschiede. Es ist keine klare Leeseite festzulegen. Auch der ACAT weist kein Leemaximum auf, sondern nur ein städtisches Minimum. Für die mittleren Windgeschwindigkeiten ergibt sich ein leichtes Nord-Nordöstliches Maximum, was einer geringen Leeverstärkung entsprechen könnte, das aber im ACAT nur schwach zutage tritt. Für die Tage mit starkem Wind entsteht die schauertypische intensive Maximumzone auf der Leeseite der Stadt, deren Position gegenüber den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten aber nicht weiter nach Lee verschoben ist. Das Maximum ist Teil eines Trends zunehmender Niederschlagshöhen, der von dem luvseitigen Umland bis zum Vorortring in Lee verläuft. Dahinter nehmen die Abweichungen wieder ab. Der stärksten Gradienten und die häufigsten Zunahmen finden sich dabei im Übergang vom Umland zu bebautem Gebiet und innerhalb Berlins.

Betrachtet man die Regentage, so gibt es bei geringen Windgeschwindigkeiten ein Maximum im Südosten des Untersuchungsgebietes. Die stark ausgeprägte Zone positiver Gebietsanomalie im Luvbereich wird im ACAT sehr deutlich. Es zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme bis in das Stadtzentrum. Danach bleiben die Werte auf etwa gleichem Niveau. Für die Regentage mit mittleren Windgeschwindigkeiten wird der von Luv nach Lee abnehmende Niederschlagstrend durch einen relativen Anstieg von der Innenstadt zum Vorortring unterbrochen. Räumlich stellt es sich so dar, dass sich

die negativen Gebietsanomalien im Osten befinden. Davon ausgehend erstreckt sich das Stadtgebiet mit negativen Abweichungen wie ein Sporn in das Gebiet positiver Abweichungen im Westen. Die Verteilung der Regentage bei Starkwind sieht der Schauerverteilung ähnlich, allerdings liegen das Hauptmaximum am Nordrand des Untersuchungsgebietes und das Nebenmaximum hinter der leeseitigen Stadtgrenze. Im ACAT kommt es erst zu einem regentypischen Stadtminimum und dann zu einem schauerartigen Leemaximum.

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit kommt es offensichtlich weniger zu einer räumlichen Verlagerung der LEEanomalie als zu einer Intensivierung. Bei schwachen Winden ist keine LEEanomalie zu erkennen, bei mittleren leicht vorhanden und bei hoher Windgeschwindigkeit deutlich ausgeprägt. Das gilt für Schauer und Regen gleichermaßen, trotz ihrer unterschiedlichen Ausgangsbedingungen. Das Stadtminimum bei Regen ist von der Windgeschwindigkeit unabhängig und bei Schauern auch bei geringer Windgeschwindigkeit vorhanden.

4.9 Einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Hypothese: Bei großräumiger Niederschlagsentstehung während einer Frontpassage ist eine andere Modifikation des Niederschlagsfeldes durch das Stadtgebiet zu erwarten als bei lokal bestimmter Niederschlagsbildung.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 9.

Nachdem eine ausführliche Betrachtung der Niederschlagstage des konvektiven und advektiven Niederschlagstyps, basierend auf der Augenbeobachtung in Berlin-Tempelhof, durchgeführt wurde, soll hier als Unterscheidungsmerkmal die vom Meteorologen vom Dienst im Wasserturm der Freien Universität für die Berliner Wetterkarte analysierte Frontaktivität zur Niederschlagseinteilung herangezogen werden. Für den Fall, dass keine Frontpassage für Berlin ausgewiesen ist, schließt das allerdings nicht sicher aus, dass die Niederschläge im Untersuchungsgebiet frontal geprägt sind. Zunächst wird die Niederschlagssituation für die Einteilung nach Fronttypen betrachtet, um sie dann auch mit den Niederschlagstypen zu kombinieren.

Betrachtet man die Niederschlagsverteilungen für Warmfronten, Kaltfronten und Okklusionen, ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen diesen. Das Bestimmtheitsmaß untereinander liegt zwischen 0,65 und 0,9; darum werden die Tage dieser drei Fronttypen im Weiteren zu der einen IDC Frontdurchgang zusammengefasst. Diese Gruppe umfasst zirka zwei Drittel aller Niederschlagstage. Für all diese Tage ist ein Nordwest-Südost-Gradient der prozentualen Gebietsanomalie erkennbar (siehe Abbildung 4-13). Innerhalb des Stadtgebietes treten dabei starke negative Werte auf. Die Windrichtungsverteilung in dieser IDC entspricht der des Gesamtzeitraums, nur dass der Anteil der wenigen Tage mit östlichen Winden noch kleiner ist. Der ACAT zeigt ein Maximum im luvseitigen Umland, eine Abnahme in das Stadtgebiet und anschließend wieder eine Zunahme auf ein sekundäres Maximum, das nicht so hoch ist, wie das Anfangsmaximum. Die Verteilung der frontalen Niederschläge

passt gut mit der der Regentage zusammen. Damit erhärtet sich die Feststellung, dass die Stadt Berlin auf advektive Niederschläge unter zyklonalem Einfluss eine intensitätsverringende Wirkung hat.

Die Tage ohne Frontpassage in Berlin rufen Minima des Niederschlags im Westen und Osten des Untersuchungsgebietes hervor, die einen Bereich positiver Abweichungen von Süd nach Nord über Berlin einschließen (siehe Abbildung 4-14). Im ACAT zeigt sich ein sehr ausgeprägtes städtisches Maximum. In der Karte erstreckt sich die Maximumzone weiter in den Leebereich im Norden und Nordosten aber auch in das südlich angrenzende Gebiet. Im Stadtzentrum befindet sich ein kleines Minimum, das durch die einfließenden Tage mit Luftmassenübergang ohne Fronten hervorgerufen wird.

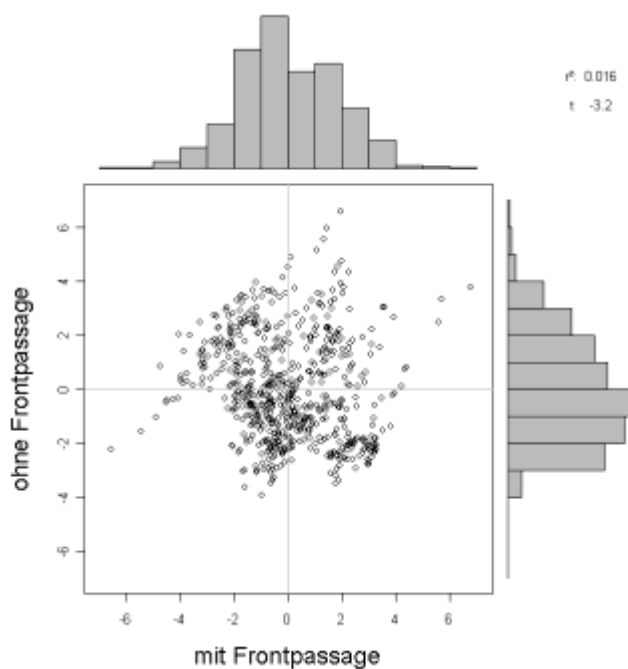


Abbildung 4-12: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie für die Teilgebiete an Niederschlagstagen mit und ohne Frontpassage

Die räumliche Niederschlagsverteilungen der Tage mit und ohne Frontdurchgang unterscheiden sich bedeutsam, ihr gemeinsames Bestimmtheitsmaß beträgt nur 0,02 (siehe Abbildung 4-12). Bezogen auf die Hypothese lässt sich verallgemeinern, dass der Stadteinfluss an Tagen mit Frontpassage den Niederschlag direkt im Stadtgebiet abschwächt. An Niederschlagstagen ohne Fronten kommt es zu einer Verstärkung über der Stadt bei gleichzeitiger Ausdehnung der Zone positiver Werte über die Stadtgrenzen hinaus.

Name: **mit Frontpassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 6289 mittlere Gesamtsumme: 17568 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 53 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,8 mm

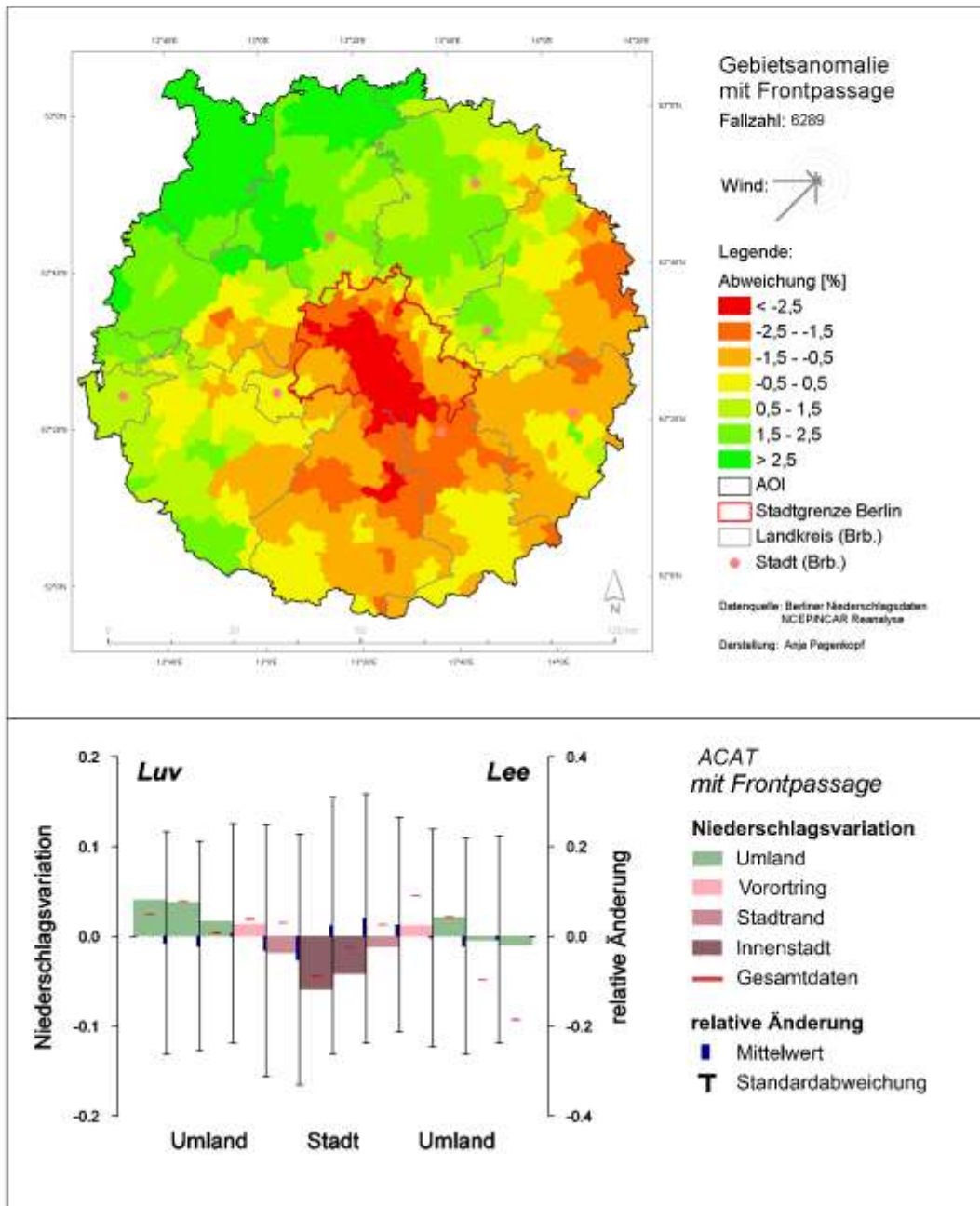


Abbildung 4-13: Übersichtsblatt der IDC mit Frontpassage

Name: **ohne Frontpassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin keine Frontpassage oder Luftmassenübergang über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 3794 mittlere Gesamtsumme: 6113 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 32 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm

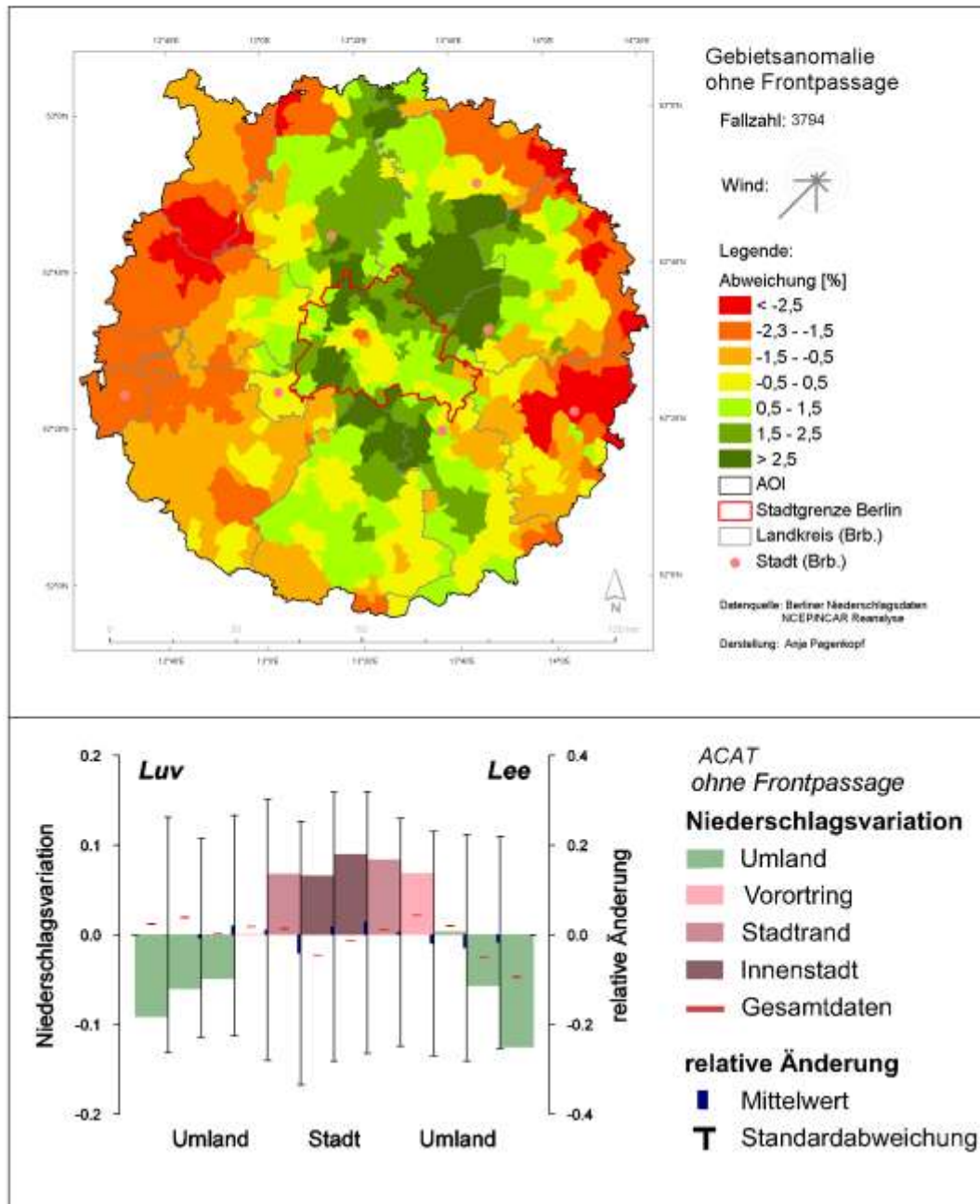


Abbildung 4-14: Übersichtsblatt der IDC ohne Frontpassage

4.10 Zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Jahreszeit

Hypothese: Auch für großräumige Prozesse, wie Frontpassagen, sind die verschiedenen Rahmenbedingungen im Sommer und Winter für die urbane Niederschlagsmodifikation von differenzierender Bedeutung.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 10.

Die Betrachtung der Jahreszeiten erfolgt nur für Sommer und Winter, damit Überlappungen der Charakteristika in den Übergangsjahreszeiten vermieden werden. Die Einteilung nach der Frontpassage ruft in den beiden Jahreszeiten auffallende Unterschiede in der Niederschlagsverteilung hervor. Bei Frontdurchgang befindet sich unabhängig von den Jahreszeiten das ausgeprägte Minimum über der Stadt. Die Lage der dominierenden Maximumzone unterscheidet sich hingegen stark. Im Sommer liegt sie am nördlichen, nordwestlichen und westlichen Rand des Untersuchungsgebietes, im Winter dagegen im nördlichen und nordöstlichen Leebereich der Stadt. Im ACAT Verlauf wird diese Verschiebung besonders deutlich. Während das Maximum im Sommer vor dem städtischen Minimum liegt, befindet es sich im Winter in Windrichtung dahinter. Die Winterverteilung erinnert stark an die mittleren Schauerverhältnisse. Die Sommersituation ist eher vergleichbar mit der Regenverteilung. Ohne Frontpassage befinden sich die Minima im Osten und Westen des Untersuchungsgebietes in den beiden Jahreszeiten in der gleichen Lage. Die Maximumzone in der Mitte ist im Winter nach Süden ausgedehnter und durch ein kleines städtisches Minimum unterbrochen. Im Sommer tritt die Maximumzone über Berlin kompakter in Erscheinung ohne ein eingeschlossenes Minimum.

Für die Tage mit Zyklonendurchzug wandert der Bereich der höheren Niederschläge im Untersuchungsgebiet von Nordwesten im Sommer nach Nordosten im Winter, bei geringeren Niederschlägen in der Stadt. Ohne Zyklonendurchzug konzentriert sich die Maximumzone im Sommer stärker über der Stadt ohne eine räumliche Verlagerung. Es ist auffallend, dass bei dieser Betrachtungsweise gerade die großräumig angetriebenen Niederschläge stärker auf die Jahreszeiten mit einer räumlichen Verschiebung des Bereiches positiver Gebietsanomalie ansprechen. Allerdings sind die Werte des Bestimmtheitsmaßes der nach der Jahreszeit unterschiedenen IDC bezogen auf die jeweilige Verteilung nach der Frontaktivität nicht sehr verschieden. Die Niederschlagsverteilung der Tage mit Frontdurchgang im Sommer weist bezüglich aller Tage mit Frontdurchgang ein Bestimmtheitsmaß (r^2) von 0,85 und im Winter von 0,66 auf. Ohne Fronten liegt es im Sommer und Winter bei 0,82. In der Zusammenschau der jahreszeitlichen Differenzierung sowohl für Schauer und Regen als auch für Frontpassagen entsteht kein klares Bild. Schauer und Frontalniederschläge werden durch die Jahreszeiten in Verteilungen mit starker positiver Leeanomalie im Winter und ohne hervorstechende Leezunahme im Sommer aufgeteilt. Regentage und Tage ohne Frontpassage hingegen weisen nur untergeordnete jahreszeitliche Unterschiede auf.

4.11 Zweifaktorielles Experiment Niederschlagstyp, Frontpassage

Hypothese: Während Schaueraktivitäten in Verbindung mit Frontpassagen nicht intensiviert werden, wird Regen an Fronten über der Stadt stärker geschwächt als im Durchschnitt.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 11.

In welchem Zusammenhang die Niederschlagstypen und die Frontaktivität im Hinblick auf den Stadteinfluss stehen, wird über die kombinierte Darstellung der beiden Merkmale untersucht. Tage mit Schauerniederschlag ohne Frontpassage zeigen ein Maximum über Berlin und insbesondere den angrenzenden Gebieten im Norden und Nordosten. Die Verteilung weicht damit nur wenig von der mittleren Niederschlagsverteilung ohne Fronten ab. Im Verlauf des ACAT ergibt sich für diesen Fall eine Verstärkung über dem urban geprägten Gebiet. Ein Stadtminimum und ein Leemaximum im Umland ergeben sich im ACAT für Schauer bei Frontpassagen. Die positiven Werte in der Karte der Gebietsanomalie liegen für die IDC Schauer an Fronten im Norden sowie Nordosten und über der Stadt, die negativen im Süden. Diese Verteilung gleicht der Kaltfrontsituation am meisten. Das Lee-Maximum ist dabei in eine sehr großräumige Struktur eingebunden, so dass kein eindeutiger Bezug zur Stadt hergestellt werden kann. Betrachtet man diejenigen Schauertage mit Kaltfronten und nachfolgenden Kaltluftsektoren genauer, denen bei der Idealzyklone Schauer zugeschrieben werden, stimmen die Verteilungen für Schauer bei Fronten und Kaltfronten gut überein. Die Maximumzone für Kaltfronttage vergrößert sich bis zur Form eines Halbmondes nach Osten um das innerstädtische Minimum.

Die räumliche Niederschlagsverteilung an Regentagen mit Frontpassage gleicht am stärksten denen von Warmfronten und Okklusionen. Der Trend zu abnehmenden Werten verläuft von Nordwesten nach Südosten, wobei die Maximumzone das Stadtminimum im Nordosten und Südwesten umschließt. Schränkt man die IDC auf Warmfrontpassagen ein, so intensiviert sich der Gegensatz zwischen dem innerstädtischen Minimum und den positiven Werten im Nordwesten. Ohne Frontdurchgang haben auch die Regentage ein städtisches Maximum, das aber nicht so ausgeprägt und zusammenhängend ist wie bei Schauertagen ohne Fronten.

Frontalniederschläge, ob als Regen oder als Schauer, werden über dem Stadtgebiet abgeschwächt. Bei der kombinierten Betrachtung sind die Verteilungen stärker von der analysierten Frontpassage als vom beobachteten Niederschlagstyp bestimmt (siehe Abbildung 4-15). Ohne großräumige Hebungsprozesse bildet sich ein Stadtmaximum unabhängig vom Niederschlagstyp aus. Allerdings erfolgt über den Niederschlagstyp eine zu erwartende Fronttypeinteilung.

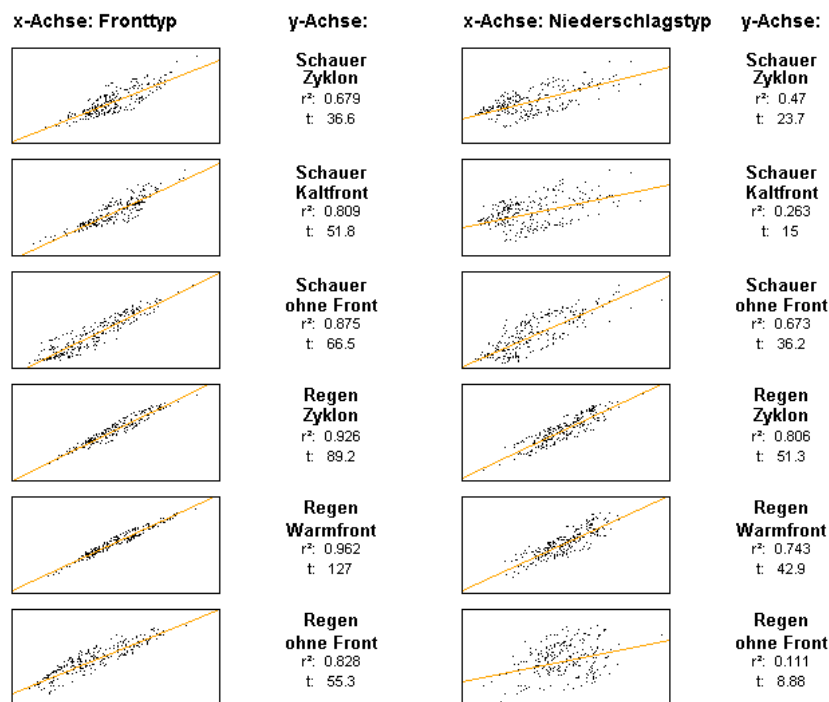


Abbildung 4-15: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie der Teilgebiete für die IDC aus der Faktorkombination Niederschlagstyp-Frontpassage bezogen auf die mittleren relativen Gebietsanomalie der IDC des jeweiligen Fronttyps in der linken Spalte, und in der rechten Spalte bezogen auf die Ausprägung der Niederschlagstypen

4.12 Einfaktorielles Experiment: Vertikalbewegung

Hypothese: Großräumig aufsteigende Vertikalbewegungen führen zu Niederschlägen unabhängig vom Untergrund, beziehungsweise kann bei überwiegender Absinkbewegung eine zusätzliche Aufstiegs-komponente der Stadt zu Niederschlagsverstärkung führen.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 12.

In dem NCEP-NCAR Reanalysedatensatz ist neben der zonalen und der meridionalen Komponente der horizontalen Luftbewegung auch die Vertikalkomponente Omega in Hektopascal pro Sekunde enthalten. Mit dieser Größe soll der städtische Einfluss auf die an Zyklonen gebundenen großräumigen Niederschläge überprüft werden. Die Verteilungen für starke und mäßige großräumige Hebung stimmen stark mit der Verteilung von Frontalniederschlägen überein. Sie weisen ein klares Stadtminimum und eine Maximumzone am Nordwestrand des Untersuchungsgebietes auf. Diese Übereinstimmung ist schlüssig, da großräumige Hebung nur an Fronten von Zyklonen möglich ist. Besonders intensive Hebung erfolgt bei konvektiver Verstärkung innerhalb der Frontalwolke. So ist es nicht erstaunlich, dass diese Verteilung mit der für die Kombination von Frontdurchgang und Schauer am besten übereinstimmt. Unter diesen Bedingungen umschließt ein Maximum von Nordosten her das Stadtminimum. Die räumliche Anordnung der negativen und positiven Gebietsanomalien der Übergangsklasse

mit geringer Hebungstendenz ist vergleichbar der allgemeinen Verteilung über alle Niederschläge. Hier überlagern sich die Strukturen der Frontal- und Konvektionsniederschläge. Im ACAT erscheint eine geringe Zunahme über der Stadt. Die Verteilungen mit überwiegender Absinkbewegung haben eine große Ähnlichkeit mit der Verteilung für die IDC ohne Frontdurchgang. Unter diesen Bedingungen fallen vornehmlich Konvektionsniederschläge, die durch lokale Aufwindschläuche mit umliegenden Absinkbereichen hervorgerufen werden und die nicht an Fronten gebunden sind. Diese Form der Hebung wird durch das der Reanalyse zugrunde liegende Wettermodell über die Rasterfläche gemittelt. Die Intensität der lokal aufsteigenden Vertikalbewegung kann somit nicht ausgegeben werden. Es bildet sich ein ausgeprägtes Maximum über der Stadt und dem direkten Umland aus. Je stärker die Absinkbewegung dominiert, desto größer wird der Gegensatz zwischen dem Stadtmaximum und den umliegenden negativen Abweichungen. Die mittlere Niederschlagshöhe nimmt von 5 mm bei intensiver Hebung kontinuierlich auf 0,9 mm bei starkem Absinken ab.

Die Hypothese kann bestätigt werden. Eine städtische Verstärkung der Niederschläge wird erkennbar, wenn der limitierende Faktor eine weiträumig eingeschränkte Vertikalbewegung ist. Bei großräumigem Aufsteigen an Fronten bestätigt sich wieder die abschwächende Wirkung des Berliner Stadtgebietes auf die Niederschlagshöhe.

4.13 Zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

Hypothese: Nur hohe Windgeschwindigkeiten ergeben eine Zone höherer Niederschläge im Leebereich der Stadt sowohl für Tage mit als auch ohne Frontpassage.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 13.

Da es sich nur um eine alternative Zusammenfassung der gleichen Geschwindigkeitsklassen wie bei der Unterscheidung von Schauern und Regen handelt, wird die Hypothese bestätigt. Sowohl Frontalniederschläge als auch die Niederschläge an Tagen ohne Fronten haben bei hohen Windgeschwindigkeiten große Zonen positiver Gebietsanomalie in Lee der Stadt ohne eine Verminderung im Stadtgebiet. Dabei stimmen die IDC Front- und Regenniederschlag sowie ohne Front und Schauerniederschlag der Starkwindtage gut überein. Zyklonenniederschläge bei schwachen und mittleren Windgeschwindigkeiten zeigen ein ausgeprägtes Stadtminimum mit einer Maximumzone am westlichen Untersuchungsgebietsrand. Im ACAT erscheint eine Niederschlagsabnahme vom Umland bis in das Stadtzentrum. In Lee der Stadt ist ein leichter Anstieg zu einem sekundären Maximum unterhalb des ACAT Mittelwertes zu verzeichnen.

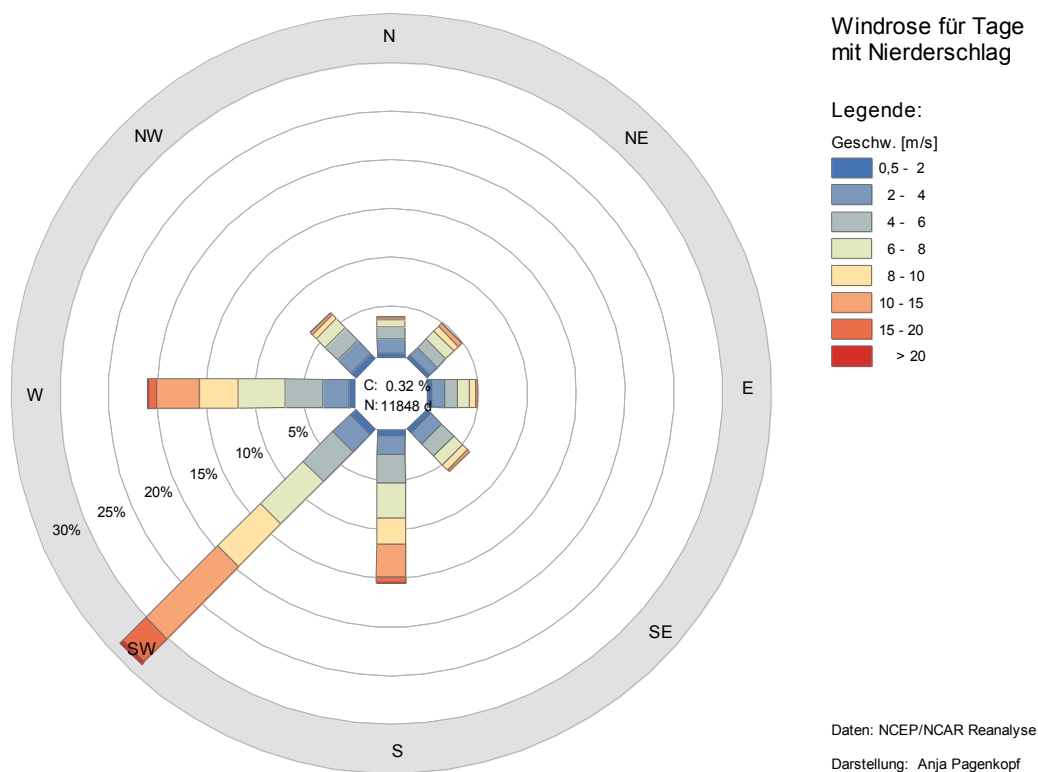


Abbildung 4-16: Stärke-Windrose der relativen Häufigkeit der mittleren täglichen Windrichtung aus den NCEP/NCAR Reanalysedaten für Niederschlagstage im Zeitraum 1951-2000

Ohne Frontdurchgang weht schwacher Wind fast gleichverteilt aus allen Richtungen. Im ACAT ist für diesen Fall keine windrichtungsabhängige Niederschlagsvariation zu erkennen. In der Kartendarstellung präsentiert sich ein Bereich höherer Niederschläge in der Südhälfte des Untersuchungsgebietes. Über dem Stadtzentrum gibt es einen kleinen Einbruch, ansonsten treten die geringsten Werte im Norden auf. Eine derartige Verteilung war in keiner anderen IDC zu beobachten. Bei mittleren Windgeschwindigkeiten unterscheidet sich die Verteilung unwesentlich von der generellen Konstellation ohne Fronten.

Eine windgeschwindigkeitsabhängige Verlagerung einer urbanen Leeanomalie kann auch auf diesem Weg nicht festgestellt werden, vielmehr ergibt sich durch die Windgeschwindigkeit eine Einteilung nach der Windrichtung (siehe Abbildung 4-16). Insbesondere die hohen Windgeschwindigkeiten treten fast ausschließlich bei West-, Südwest- und Südwind auf. Die Niederschlagsverteilung der hohen Windgeschwindigkeiten stimmt gut mit der für Südwestwinde überein.

4.14 Einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Hypothese: Die Position der urbanen Lee-Anomalie verlagert sich windrichtungsabhängig innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 14.

Nachdem die Windgeschwindigkeitsanalyse (siehe Kapitel 4.14) nicht die erwartete Lagebeziehung von Stadt und Niederschlagsmaximum ergeben hat, wird überprüft, ob eine direkte Beziehung mit der Windrichtung hergestellt werden kann. Es ergeben sich für jeden Richtungssektor klare räumliche Strukturen mit zusammenhängenden Bereichen positiver und negativer Gebietsanomalien. Für Südwestwind erstreckt sich die positive Gebietsanomalie vom nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes bis in den Leebereich der Stadt. Vom Oderbruch bis in den Süden sind die Anomaliewerte negativ. Werden die Karten der weiteren Windsektoren im Uhrzeigersinn gegenübergestellt, ist festzustellen, dass sich die prägende Zone positiver Abweichung in entgegengesetzter Richtung verschiebt, bis sich das Niederschlagsmaximum für Südostwind im Südosten befindet. In der Abbildung 4-17 ist der Vergleich graphisch zusammengefasst. Eine Ausnahme stellt die Verteilung für den Südsektor dar, mit einer Zone positiver Werte von Süden nach Norden und mit Bereichen negativer Anomalien im Osten und Westen. Die Korrelationsmatrix in Abbildung 4-18 verdeutlicht die kontinuierlichen Veränderungen zwischen den Verteilungen. Benachbarte Sektoren weisen eine gewisse Ähnlichkeit auf, mit einem Bestimmtheitsmaß von $0,35 < r^2 < 0,85$, während mit den anderen Sektoren wenig bis keine gleichlaufende Variabilität festzustellen ist. Mit einem Wert von r^2 kleiner 0,1 wird ein Bruch zwischen dem Süd- und Südwestsektor ersichtlich. Ein sekundäres Minimum des Bestimmtheitsmaßes liegt beim Übergang vom Nord- zum Nordostsektor.

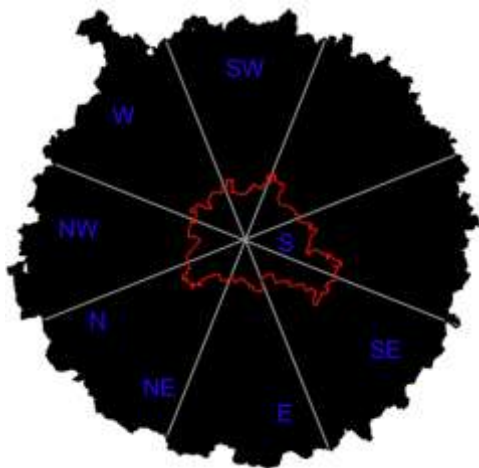


Abbildung 4-17: Lage der dominanten Zonen positiver Niederschlagsanomalie für die Windrichtungssektoren

Eine markante, wiederkehrende, positive Niederschlagszunahme hinter der Stadt ist nicht zu erkennen. Für den Südwest- und Nordostsektor wird eine potentielle positive Leeanomalie durch das großräumige Maximum überlagert. Für die beiden Windrichtungen mit Maximumzone in Luv, Nordwest sowie Südost, ist kein Lee-Maximum feststellbar. Im Verlauf des ACAT für Nordwestwind ist jedoch eine leicht zunehmende Tendenz in Lee vorhanden. Diese wird aber vergleichbar mit dem West-, Nord- und Ostsektor eher durch eine städtische Minimumzone hervorgerufen. Für den Südsektor ergibt sich im ACAT sogar eine Abnahme hinter dem Stadtzentrum. Eine urbane Lee-Anomalie kann also über eine windrichtungsabhängige Betrachtung der Niederschlagsverteilung in Berlin und Brandenburg nicht abgeleitet werden.

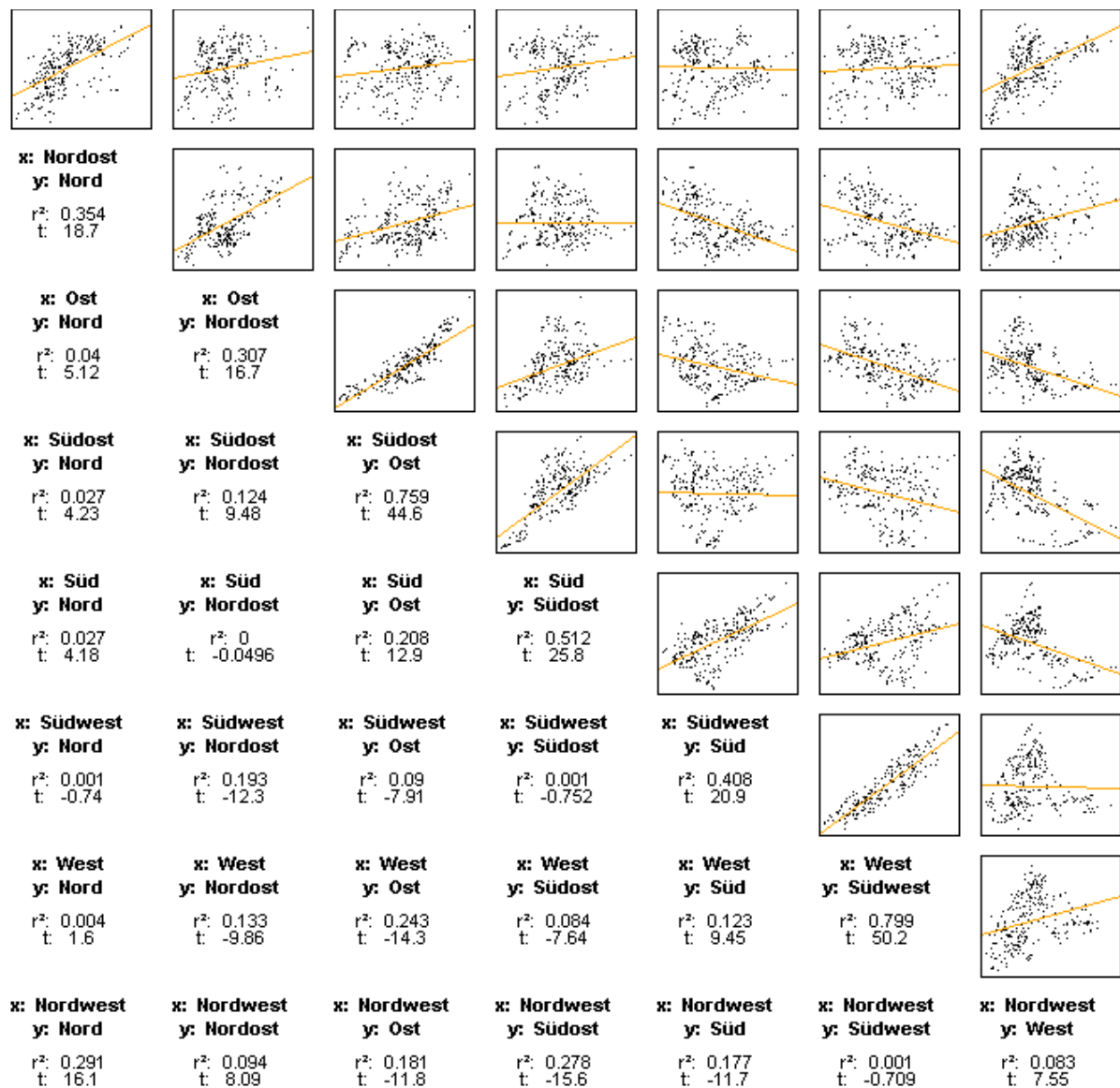
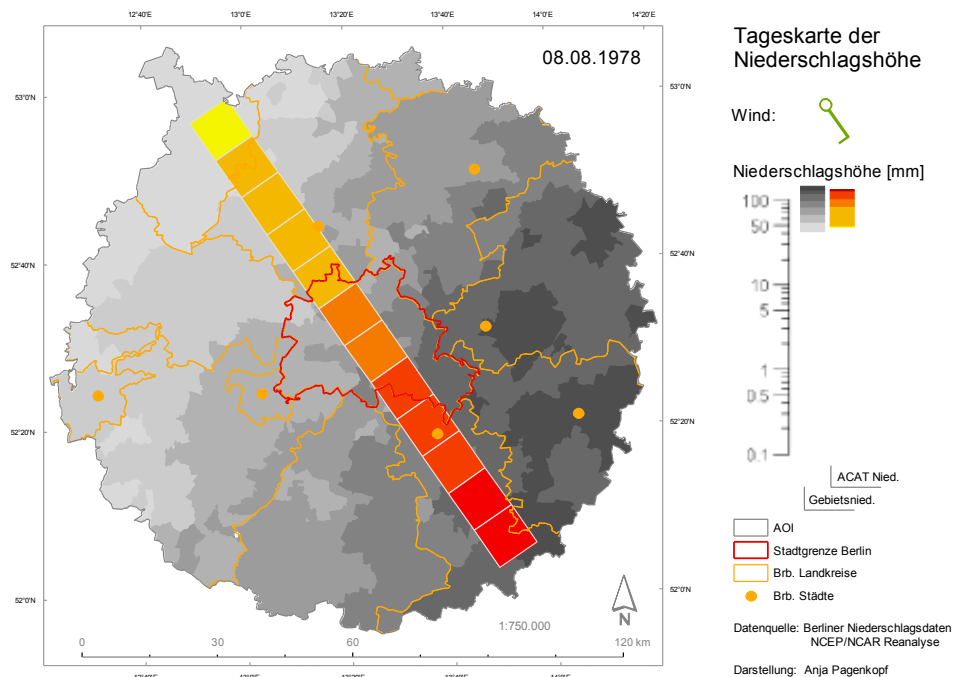


Abbildung 4-18: Streudiagramm und Korrelationsmatrix der windrichtungsbezogenen IDC untereinander

Der städtische Einfluss ist offensichtlich gering im Vergleich zu den größerskaligen Faktoren, die durch die Einteilung nach der Windrichtung abgebildet werden. Großräumige Niederschlagsbildung ist im Norddeutschen Tiefland an zyklonale Hebungsprozesse gebunden. Die Verschiebung des Niederschlagsmaximums entsteht möglicherweise durch folgende Konstellationen: Bei zonaler Höhenströmung ziehen die Zyklonen von Westen in das Untersuchungsgebiet. Das Tiefzentrum zieht dabei meist im Norden vorbei. Mit zunehmender Entfernung zum Zentrum und größerer Distanz über Land nimmt die Niederschlagshöhe ab. Es ergibt sich daraus eine Zonierung der Niederschlagshöhen von Nordwest nach Südost. Der zonalen Zirkulation sind die drei westlichen Sektoren zuzuordnen. Sie umfassen etwas über zwei Drittel aller Niederschlagstage.

Die anderen Windrichtungen sind meridionaler Strömung zuzuordnen. Ihnen ist gemeinsam, dass der Bereich der höheren Niederschläge im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes liegt. Die Niederschlagsverteilung der Tage mit Südostwind ist dabei auffällig durch die Vb Zyklonenzugbahn geprägt. Zyklonen mit dieser Zugbahn erzeugen häufig intensive Niederschläge, da sie warme und wasserdampfreiche Luft vom Mittelmeer gegen einen ausgeprägten Trog kalter Luft über Mitteleuropa führen und aus dem Temperaturgegensatz eine starke Hebungsdynamik entwickeln. Als Beispiel für eine typische Niederschlagsverteilung durch Zyklonen auf der Vb Zugbahn ist die Karte der Niederschlagshöhe für den 8. August 1978, mit den höchsten gemessenen Tagessummen im Untersuchungszeitraum, dargestellt (siehe Karte 4-1). Für die benachbarten Süd- und Ost-Sektoren könnte als analogem Erklärungsansatz gelten, dass das Untersuchungsgebiet grob verallgemeinert an der Trogvorderseite liegt. An der Trogrückseite befindet sich das Untersuchungsgebiet an den Tagen mit Nord- und Nordostwind. An diesen Tagen ziehen die Zyklonen überwiegend an der West- und Südseite des Untersuchungsgebietes entlang und regnen dort stärker als im Norden und Osten. Wenn es bei den meridionalen Anströmungen regnet, dann gewinnen die Eigenschaften der beteiligten Luftmassen an Bedeutung. Die Luft aus den südlichen Bereichen ist wasserdampfreicher, wodurch sich im klimatologischen Mittel eine Abnahme der Niederschläge von der warmen Luft zur kalten Luft im Trog ergibt. Die räumliche Differenzierung beträgt in allen windrichtungsabhängigen IDC zirka zehn Prozent. Am stärksten ausgeprägt ist sie für die Südwestwindsituationen mit den hohen absoluten Tagessummen.

In der räumlichen Verteilung der Niederschläge bezogen auf die Windrichtungen kann eine allgemein gültige positive Anomalie in Lee Berlins nicht festgestellt werden. Es fällt jedoch auf, dass sich im Stadtgebiet ein relatives Minimum des Niederschlags ausbildet. Betrachtet man diesbezüglich den Verlauf der Niederschlagshöhe entlang des ACAT, so ist das städtische Minimum nicht für alle Sektoren sehr deutlich. Der Verlauf der relativen Änderungen auf der Luvseite offenbart jedoch mindestens beim Übergang vom Stadtrand zur Innenstadt Abnahmetendenzen. Die ACATs der Richtungssektoren bestätigen lediglich die großräumige Variabilität und geben keinen klaren Hinweis für eine städtische Modifikation des Niederschlagsfeldes.



Karte 4-1: Tageskarte der Niederschlagshöhe vom 08. August 1978, der Tag mit den höchsten gemessenen Werten innerhalb des Untersuchungszeitraums (1951-2000) als Fallbeispiel einer Niederschlagsverteilung für einen Tag mit einem Tiefdrucksystem auf der Vb Zyklonenzugbahn nach van Bebber.

4.15 Zweifaktorielles Experiment: Frontdurchgang, Windrichtung

Hypothese: Die räumliche Niederschlagsverteilung für Tage mit Frontdurchgang ist eine Folge der kombinierten windrichtungsabhängigen Niederschlagsstrukturen.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 15.

Die auffällige Rotation der Maximumzone entgegen der Windrichtungsrotation (siehe Abbildung 4-17) soll für Tage mit Frontniederschlägen und solche ohne Frontpassage überprüft werden. Die Lage der prägnanten Maximumzone im Untersuchungsgebiet bleibt auch unter Berücksichtigung der Unterscheidung nach dem Vorkommen einer Frontpassage maßgeblich abhängig von der großräumigen Windrichtung. Die Windrichtung ist somit der dominante Faktor für die großräumige Niederschlagsanordnung, die außerdem kaum wiederkehrende kleinräumige Unterschiede erkennen lässt. Es ist also weniger relevant, ob ein Niederschlagsfeld an eine Front gebunden ist als der Weg, auf dem es sich über das Untersuchungsgebiet bewegt. Als UIP ist ein Stadtminimum für die Fälle mit Fronten vorhanden. Für die Tage mit West-, Südwest-, Süd- und eingeschränkt bei Südostwind ohne Frontdurchgang ergeben sich indessen kein innerstädtisches Minimum, sondern positive Werte der Gebietsano-

malien. Im ACAT-Diagramm stellt sich für diese vier IDC ein Stadtmaximum dar, wie es IDC über alle Tage ohne Fronten auch in Erscheinung tritt.

Bei den häufigsten Winden aus westlichen Richtungen haben Frontalniederschläge einen Anteil von über 60 Prozent an den Niederschlagstagen (siehe Abbildung 4-19). Die Maximumzonen für diese Windrichtungen erstrecken sich vom Norden des Untersuchungsgebietes bis in den Westen. Zusammengesetzt ergeben sie die bogenförmige Anordnung der positiven Gebietsanomalien bei Frontdurchgang.

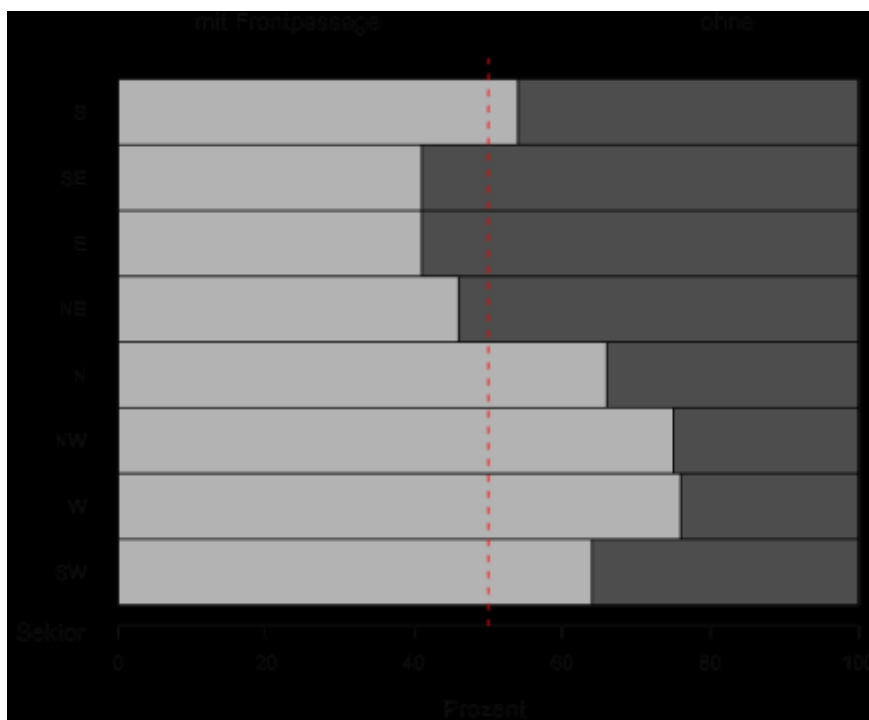


Abbildung 4-19: Aufteilung der Niederschlagstage mit und ohne Frontpassage nach Windrichtungen

4.16 Einfaktorielles Experiment: Luftmassen

Hypothese: Maritime Luftmassen erleichtern die Ausbildung von Stadteinflüssen auf die Niederschlagsverteilung.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 16.

Die Klasse der maritimen Nordluft wird in Berlin am häufigsten zusammen mit Niederschlägen angetroffen. Sie wird durch Zyklonen in das Untersuchungsgebiet transportiert und ist dabei Kaltfronten und dem Kaltluftsektor zuzuordnen, so dass mit schauerartigen Niederschlägen zu rechnen ist. Es zeigt sich für diese IDC ein Leemaximum wie bei Schauertagen, aber auch eine innerstädtische Minimumzone wie bei Frontniederschlägen. Kontinentale Nordluft kommt überwiegend mit Winden aus dem Nordostsektor. Für diesen Fall befindet sich in der gesamten Südhälfte ein ausgedehnter Bereich mit ausgeprägter positiver Gebietsanomalie. Der Norden und Nordosten des Untersuchungsgebietes ist

durch negative Abweichungen gekennzeichnet. Das Stadtgebiet ist durch eine deutliche Niederschlagsreduktion geprägt. Ein kleiner Bereich des Barnims weist darin positive Werte auf. Diese Verteilung entspricht ziemlich genau der Überlagerung der Niederschläge mit Wind aus dem Nord-, Nordost- und Ostsektor. Die Niederschlagssituation für maritime Mittelbreitenluft ist der maritimen Nordluft sehr ähnlich. Luftmassen mit kontinentalem Charakter aus den Mittelbreiten rufen eine von West nach Ost abnehmende Zonierung der Niederschläge im Untersuchungsgebiet mit einem verstärkten Gradienten an der luvseitigen Stadtgrenze hervor. Innerhalb des ACAT ist dieser starke Gradient zum städtischen Minimum gut zu erkennen. Nur ein Wiederanstieg auf der Leeseite wird durch den großräumigen Trend fast aufgehoben. Eine Überlagerung der IDC mit Wind aus dem Südwest- und Westsektor ergibt die Niederschlagsverteilungen der maritimen Südluft, die fast ausschließlich mit Südwest und Westwind in das Untersuchungsgebiet transportiert wird. Es entsteht eine von Nord nach Süd abnehmende Einteilung, die im ACAT einer Luv-Lee-Einteilung entspricht, die in der Luvhälfte der Stadt einer Abnahme und in der Leehälfte einer Zunahme der Niederschläge zur Folge hat. Luftmassen der Gruppe Kontinental Süd wurden in Berlin nur für 22 Niederschlagstage in 50 Jahren als prägende Luftmasse erfasst. Damit ist die Aussagekraft dieser IDC nicht ausreichend. Wenn es zu dieser Konstellation kam, regnete es stärker im Westen und Nordwesten des Untersuchungsgebietes, und in der Stadt entstand wieder ein Niederschlagsminimum.

Bezüglich des Stadteffektes konnten durch die Einteilung der Niederschlagstage nach Luftmassenklassen keine vertiefenden Erkenntnisse gewonnen werden. Maritime Luftmassen von Norden und den Mittelbreiten repräsentieren zusammen über 80 Prozent der Niederschlagsereignisse, wodurch eine Abgrenzung von der durchschnittlichen Anordnung der Niederschlagshöhen nicht möglich ist. Auffällig ist hingegen, dass die Verteilungen bei kontinentalen Luftmassen stark mit den Windrichtungsverteilungen der häufigsten Windsektoren übereinstimmen. Bei Einbeziehung der Luftmassen zur Erklärung dieser Verteilungen ruft der kontinentale Luftmassencharakter eine Reduktion der Niederschläge abnehmender Stärke bei zunehmender Entfernung zum Quellgebiet hervor. Bei kontinentaler Nordluft befinden sich die negativen Abweichungen im Nordosten, bei Mittelbreitenluft im Osten und bei Südluft im Südosten. Erwartungsgemäß ist die mittlere Niederschlagshöhe bei kontinentaler Luft geringer gegenüber maritimer Luft und nimmt mit der Verschiebung des Ursprungsgebietes von Norden nach Süden zu.

4.17 Einfaktorielles Experiment: Großwettertyp

Hypothese: Großwettertypen differenzieren die Niederschläge als Kombination von Windrichtung und Vertikalbewegung.

Der vollständige Kartensatz befindet sich im Anhang Abschnitt 17.

Die Niederschlagsverteilungen der IDC für die nach der Strömungsrichtung klassifizierten GWT (siehe Tabelle 3-7) zeigen das Verhalten zufälliger Teilmengen. Sowohl die räumliche Verteilung der Ge-

bietsanomalie als auch die Windrichtungsverteilung sind den durchschnittlichen Verhältnissen über alle Niederschlagstage sehr ähnlich. Die Abfolgen der Niederschlagsvariation im ACAT-Diagramm stellen sich sehr diffus dar, aber die relativen Änderungen zeigen immer mindestens eine Abnahme vom Stadtrand ins Stadtzentrum und anschließend wieder Niederschlagszunahmen.

Für die IDC, für die weniger die Höhenströmungsrichtung und mehr die antizyklonale und zyklonale Prägung als Klassifizierungskriterium der GWL herangezogen wurde (siehe Tabelle 3-7), sieht die räumliche Verteilung der Niederschläge ebenfalls unspezifisch aus. Es konnte keine räumliche Differenzierung und auch kein Hinweis auf urbane Modifikation der Niederschläge ermittelt werden. Auch in der Arbeit von Schütz (1995: S. 45) wurde festgestellt, dass eine „Identifikation der für urbane Modifikation besonders geeigneten Großwetterlagen, leider nicht zu Erfolg geführt hat.“

4.18 Resümee der Experimentalauswertungen

Die Basishypothese, dass verschiedene Ausprägungen atmosphärischer Zustände differenzierte räumliche Muster des Niederschlags hervorrufen, hat sich bestätigt, wobei ein lokaler Einfluss des Stadtkörpers erkennbar ist. Zusammengefasst haben sich mittels der klassifizierten Darstellungen der Niederschlagstage fünf charakteristische Anordnungen der Niederschlagshöhe für das Untersuchungsgebiet in und um Berlin ergeben:

- die Niederschläge nehmen von Nord und West nach Südosten ab, zusätzlich existiert ein klar erkennbares Stadtminimum – z.B. Tage mit dem Niederschlagstyp Regen und mit Frontdurchgängen (siehe Abbildung 4-4)
- mit einer Maximumzone im Nordosten und Norden angrenzend an die Stadt ohne Stadtminimum – z.B. der Niederschlagstyp Schauer (siehe Abbildung 4-3)
- die Maximumzone liegt direkt über der Stadt und reicht etwas darüber hinaus – z.B. Tage ohne Frontdurchgänge (siehe Abbildung 4-14)
- das Maximum im Südosten mit konstanter Niederschlagsabnahme nach Nordwesten – z.B. Tage mit Wind aus dem Südostsektor (siehe Karte 4-1)
- mit dem Maximum im Südwesten, bei der sich auch ein Stadtminimum darstellt – z.B. Regentage mit geringer Intensität oder Tage mit Wind aus dem Nordsektor

Nach dem Vergleich dieser fünf Verteilungsformen können die Verteilungen 1, 4 und 5, die ein Stadtminimum aufweisen und deren Position des Hauptmaximums hauptsächlich durch die Windrichtung bestimmt wird, zu der *Kategorie der großräumigen, lokal unabhängigen Niederschlagsgenese* zusammengefasst werden. Die beiden charakteristischen Verteilungen 2 und 3 weisen keine übergeordnete großräumige Niederschlagsstrukturierung auf. Für diese *Kategorie der lokal beeinflussten Niederschlagsgenese* dominiert ein positiver Stadteffekt auf die Niederschlagshöhe. Die Tage mit Schauern unterscheiden sich dabei von den Tagen ohne Fronten durch die Lage des ausgeprägten Maximums

bezogen auf die Stadt. Im Fall der Schauer befindet sich das Niederschlagsmaximum im Leebereich, während es sich für die Tage ohne Fronten direkt über der Stadt ausbreitet. Für weiterführende prozessorientierte Analysen ergeben sich folgenden Fragen:

- Warum ergibt sich für die Kategorie der großräumigen, lokal unabhängigen Niederschlagsgene-
se eine Abnahme der Niederschlagshöhe über der Stadt?
- Warum kommt es zur Niederschlagsverstärkung sowohl direkt über als auch in Lee der Stadt?

In der Tabelle 4-1 sind alle Implemented Data Collections mit ihren Ausprägungen der möglichen urbanen Modifikation zusammengestellt.

Tabelle 4-1: Übersichtstabelle über getestete Bedingungen zur Ausbildung einer urbanen Niederschlagsverstärkung (+) oder eines innerstädtischen Minimums (-)

| | | Schauer | Regen | m. Front | o. Front |
|------------------|---|---------|-------|----------|----------|
| Schauer | + | | | - /+ | + |
| Regen | - | | | - | + |
| Sommer | | - | - | - | + |
| Winter | | + | - /+ | - /+ | + /- |
| UHI+ | | + | + | | |
| UHI- | | + | - | | |
| I. gering | - | - | - | | |
| I. hoch | + | + | - | | |
| ff gering | | - | - | - | - |
| ff hoch | | + | + | + | + |
| m. Front | - | | | | |
| o. Front | + | | | | |
| Omega- | - | | | | |
| Omega+ | + | | | | |
| dd | - | | | - | (-) |

Legende: **m. Front**: mit Frontdurchgang, **o. Front**: ohne Frontdurchgang, **UHI+**: eine Wärmeinsel, **UHI-**: keine Wärmeinsel, **I. gering**: geringe Niederschlagsintensität, **I. hoch**: hohe Niederschlagsintensität, **ff gering**: geringe Windgeschwindigkeit, **ff hoch**: hohe Windgeschwindigkeit, **Omega-**: aufsteigende Luftbewegung, **Omega+**: absteigende Luftbewegung, **dd**: Windrichtung

5 Diskussion

5.1 Literaturvergleich

Zunächst sollen die in der vorliegenden Arbeit erzielten Resultate bisher veröffentlichten Untersuchungen zu Niederschlagsverteilungen über Städten gegenübergestellt werden. Zur eindeutigen Bezeichnung der in dieser Fallstudie ermittelten Ergebnisse, werden sie im Folgenden mit der Bezeichnung *Niederschlagsklimaanalyse-Berlin* zusammengefasst.

Die Niederschlagsmessungen an 24 Stationen in einem Radius von zehn Kilometern um das Zentrum der Stadt Köln über das Beobachtungsjahr 1955/56 wurden von Kalb (1962) untersucht. Aufgrund der Lage der Stadt im Kölner Becken weist das Untersuchungsgebiet einen orographisch bedingten WSW-ENE Gradienten auf. Zur Analyse wurde das Untersuchungsgebiet in konzentrische Ringe gegliedert. Die Messwerte wurden für Schauer und Aufgleitniederschläge separat betrachtet. Die Darstellung erfolgte windrichtungsabhängig für vier Richtungssektoren als Isohyetenkarten. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass „während bei den Aufgleitregen das Hauptmaximum im Stadtzentrum bzw. im linksseitigen Randsektor zu finden ist, ist es bei Schauern mehr ins Lee und den rechtsseitigen Sektor verschoben, eine Zunahme macht sich im letzteren Fall erst unmittelbar am Stadtkern bemerkbar (Kalb, 1962: S. 99)“ (siehe Abbildung 5-1). Hervorgehoben werden muss, dass Kalb vor den Veröffentlichungen zu La Porte und METROMEX bereits eine Leeverstärkung von stärkeren Schauern durch höhere Temperaturen oder die Anreicherung von Kondensationskernen feststellte. Eine derartige Verstärkung der Schauer bestätigt sich auch für die lange Betrachtungsperiode in Berlin (siehe Abbildung 4-3). In der Darstellung der Advektionsniederschläge beginnt die städtische Verstärkung bereits in den luvseitigen Randgebieten, als Ergebnis von Stau und damit verbundener Aufwärtsbewegung. Ein Luvmaximum konnte ebenfalls für mehrere Einzeltage der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin festgestellt werden, im Mittel aber ist es nicht nachweisbar oder wird durch den großräumigen Gradienten überdeckt.

In kleinräumigeren, auf das Stadtgebiet von Berlin beschränkten Untersuchungen wurde Ende der siebziger Jahre ein Niederschlagsmaximum auf der Luvseite Berlins sowohl durch das Meteorologische Institut der Humboldt-Universität zu Berlin als auch das Meteorologische Institut an der Freien Universität festgestellt. Dieses Maximum wurde darin auf orographische Effekte durch die Havelhöhen und den Spandauer Forst zurückgeführt (Graf undGräfe, 1979; Schlaak, 1977).

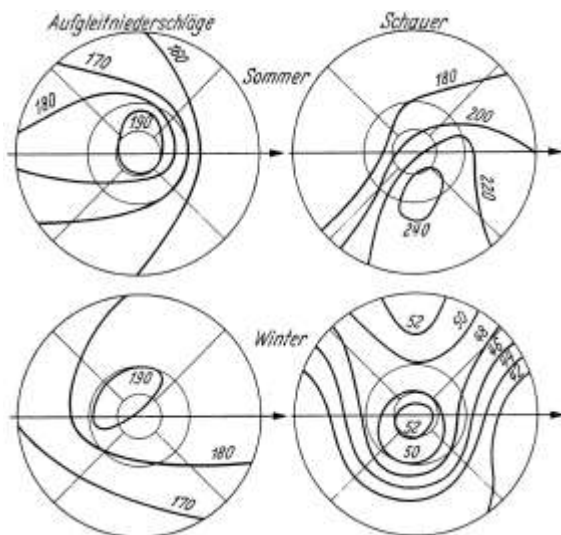


Abbildung 5-1: Niederschlagsverteilung in Abhängigkeit von der Windrichtung (Kalb, 1962: S. 98)

An der HU Berlin führten Graf und Gräfe (1979) eine Betrachtung der wetterabhängigen Niederschlagsverteilungen für eine zehnjährige Zeitreihe durch. Dazu nahmen sie zum einen eine jahreszeitliche Einteilung der Niederschläge für zyklonale und antizyklonale relative Vorticity in der 500mbar-Höhenströmung vor und betrachteten zum anderen die windrichtungsabhängigen Niederschlagsverteilungen, bezogen auf den Bodenwind an der Station Berlin-Dahlem. Sie wählten einen relativen auf den Gebietsniederschlag bezogenen Ansatz. Die dort gemachte Einteilung nach der Zyklonalität entspricht konzeptionell der vorgenommenen Klassifizierung nach dem Frontdurchgang in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin. Vergleicht man die Ergebnisse der Untersuchung von Graf und Gräfe mit den in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin erstellten Karten, kann eine Übereinstimmung der Hauptmerkmale der Niederschlagsstruktur innerhalb des Stadtgebietes festgestellt werden. Die Analyse von Graf und Gräfe bezieht sich auf einen Teildatensatz des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Berliner Niederschlagsdatensatzes (die Jahre 1965-1974). Die Interpretation der Verteilungen unterscheidet sich jedoch durch die Größe des betrachteten Untersuchungsgebietes wesentlich. Während bei Graf und Gräfe das Untersuchungsgebiet nur wenig über die Stadtgrenze hinaus reicht und die analysierten räumlichen Niederschlagsstrukturen kleiner als die Stadt sind, wird in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin von mindestens vergleichbaren Größen des Auslösegebietes und des Wirkungsgebietes ausgegangen. In der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin tritt für Fronttage keine herausragende Maximumzone am Westrand Berlins innerhalb des großräumig abnehmenden Niederschlagstrends in Nordwest-Südost-Richtung auf (siehe Abbildung 4-13). Von Graf und Gräfe wurde am Westrand Berlins für zyklonale Tage ein isoliertes Niederschlagsmaximum ausgewiesen, das vermutlich aufgrund der Datenlage nicht als Teil einer größeren Anordnung erkannt werden konnte, und mit den direkt an dieser Stelle vorkommenden Eigenschaften der Erdoberfläche, den Erhebungen des Grunewaldes und der Havelhöhen, erklärt (siehe Abbildung 5-2 a). Das auch von Graf und Gräfe ausgewiesene innerstädtische Minimum wurde von ihnen korrespondierend zu dem orographischen Maximum als Regen-

schattengebiet angesehen. Auf der klimatologischen Leeseite der Stadt wurde im Winter der orographische Anstieg auf den Barnim für die Erklärung des Maximums herangezogen. Im Sommer jedoch ist der orographische Effekt auf die Niederschläge bei Zyklonalität nicht so stark, dafür zeigt sich ein Maximum an der östlichen Stadtgrenze als Stadteffekt. Ihre Begründung ist, dass der orographische Einfluss für die im Winter dominierenden advektiven Niederschläge stärker ist als für konvektive Niederschläge. Die überwiegend im Sommer auftretenden Schauer werden ihrer Ansicht nach durch die Stadt verstärkt und lösen das Leemaximum aus (siehe Abbildung 5-2 b).

zyklonale Wirbelgröße im 500-hPa-Niveau

antizykl. Wirbelgröße im 500-hPa-Niveau

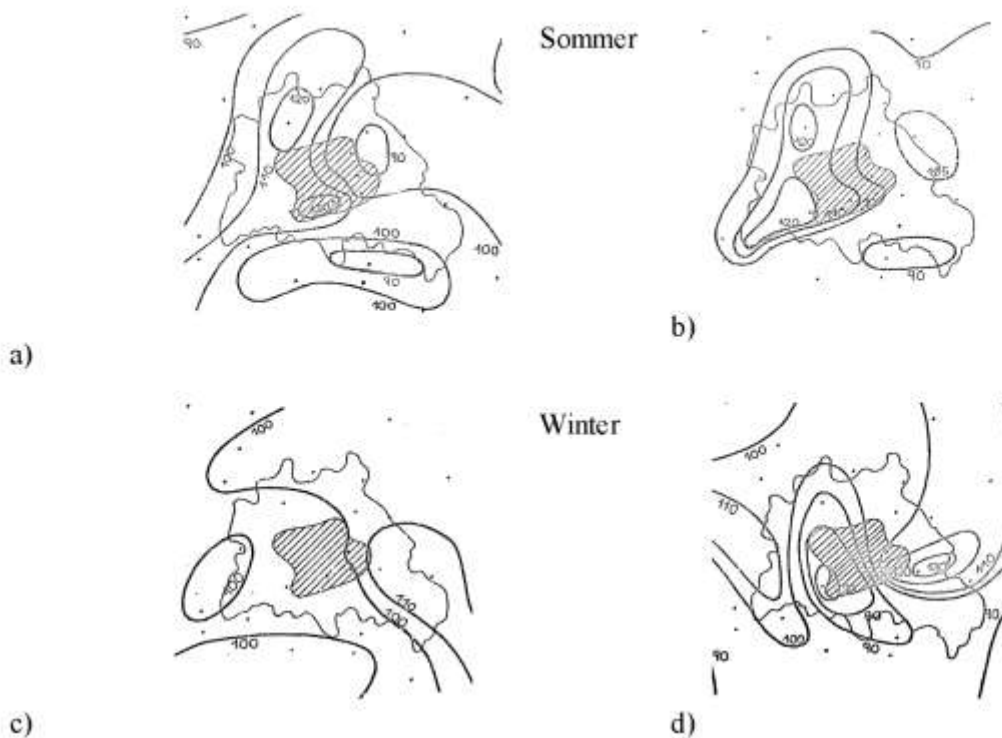


Abbildung 5-2: Niederschlag in Prozent des Gebietsmittels (Graf, 1979: S. 173f, 177f)

Die in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin festgestellten Ergebnisse weisen genau in entgegengesetzter Richtung. An Sommertagen mit Frontdurchgang umschließt eine sich von Nordwesten ausdehnende Maximumzone das Minimum über Berlin ohne erkennbare Leeverstärkung. Im Winter hingegen erstreckt sich eine intensive Maximumzone in Lee Berlins nicht nur auf dem Hang des Barnims, sondern auch weiter in nördlicher Richtung im Bereich des Glins aber auch des Eberswalder Urstromtals. Wenn die IDC der Sommer- und Winterregen sowie die Schauer einbezogen werden, ist anzunehmen, dass besonders die Winterschauer eine Leeverstärkung hervorrufen (siehe Anhang 3-2). Ein orographischer Effekt auf die Winterregen bei Frontdurchgang kann gleichzeitig nicht ausgeschlossen werden. Unter antizyklonalen Verhältnissen wurden von Graf und Gräfe in einem größeren Gebiet im Osten positive Abweichungen ausgewiesen und dafür im westlichen Teil Berlins, wo sich bei zyklonalen Verhältnissen das Luvmaximum befand, negative Werte. Für den Sommer sind dabei stärkere Gegen-

sätze aufgetreten als im Winter (siehe Abbildung 5-2 c und d). Diese Schlussfolgerungen können mit der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin nicht bestätigt werden. Ohne Fronten zeigt sich eine Maximumzone über dem gesamten Stadtgebiet und über angrenzenden Gebieten, die im Winter von einem kleinräumigen Minimum über dem Stadtzentrum überlagert wird (siehe Abbildung 4-14). Die Überlegungen bezüglich eines Erklärungsansatzes, der auf der städtischen Konvektionsverstärkung basiert, stimmen aber überein. Die Untersuchung der Abhängigkeit der Niederschläge von der Windrichtung ergab für Graf und Gräfe eine klare Leeanomalie durch West- sowie Südostwind und ein Luvmaximum am Stadtrand bedingt durch die bewaldete Orographie beziehungsweise durch Rauigkeitseffekte. Derartige windrichtungsabhängige Verschiebungen des Stadteffektes konnten mit den in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin erzielten Ergebnissen nicht ermittelt werden. Die Windrichtungsdifferenzierung stimmt weitgehend mit unterschiedlichen synoptischen Niederschlagsanordnungen überein.

Malberg und Frattesi (1990) haben eine windrichtungsabhängige Untersuchung der Niederschlagsverhältnisse für einen siebenjährigen Zeitraum vorgenommen. Sie sind dabei zu keinen signifikanten räumlichen Unterschieden für die acht Richtungssektoren gekommen und erklären die Anordnung der Niederschläge ausschließlich mit der orographischen Situation des Berliner Urstromtals zwischen den Grundmoränenplatten. Das innerstädtische Minimum entsteht ihrer Meinung nach durch die Absinkbewegung in das Urstromtal, wobei sie zusätzlich auf die Analogie der Nachlaufwirbel hinter einzelnen Baukörpern hinweisen, die bei der Erhöhung der Rauigkeit über der Stadt die Absinkbewegung noch verstärken könnten. Eine derartige Konstanz der Niederschlagsverhältnisse bezogen auf die Orographie für alle Windrichtungen konnte durch die Niederschlagsklimaanalyse-Berlin nicht abgeleitet werden.

Im Rahmen des groß angelegten Metropolitan Meteorological Experiment (METROMEX) für St. Louis (USA) wurden Analysen der Niederschläge für die Zugbahnen von Schauerzellen durchgeführt. Die mittlere Niederschlagsverteilung der Sommerniederschläge der Jahre 1971-75 weist eine Maximumzone der Niederschlagshöhe im Norden und Nordosten der Stadtgrenzen von St. Louis auf, im südwestlichen Stadtgebiet hingegen ein ausgedehntes Minimum (siehe Abbildung 5-3). In der Zusammenfassung sind die Beteiligten zu dem Schluss gekommen, „[...] die Untersuchungen der räumlichen Niederschlagsstrukturen in Zusammenhang mit verschiedenen Kombinationen von Bodenwind und Schauerzugbahnen unterstützt die Annahme einer urban verursachten Verstärkung des Niederschlags [...] , aber die Anhaltspunkte sind nicht konsistent genug für die verschiedenen Windrichtungskombinationen, um einen abschließenden Beweis für den städtischen Einfluss zu erhalten.“⁶

⁶ “The investigation of spatial rainfall patterns associated with various combinations of surface winds and storm movements provided support for an urban-induced enhancement of rainfall by the urban-

(Vogel und Huff, 1978: S. 1151)“ Die Unterscheidung nach synoptischen Wettertypen zeigte für Kaltfronten und für Schauerlinien⁷ vor der Kaltfront eine Lee-Verstärkung. Bei Niederschlägen aus luftmasseninternen Schauern, Schauergruppen⁸ und an Warmfronten gibt es Hinweise auf eine mögliche Niederschlagsunterdrückung, auf die nicht vertiefend eingegangen wird. Auch wenn die Schaueraktivitäten für St. Louis von größerer Bedeutung sind als für Berlin, stimmt die Verstärkung von Schauern an Kaltfronten für beide Fälle überein, ebenso die Niederschlagsverringerung bei Warmfronten.

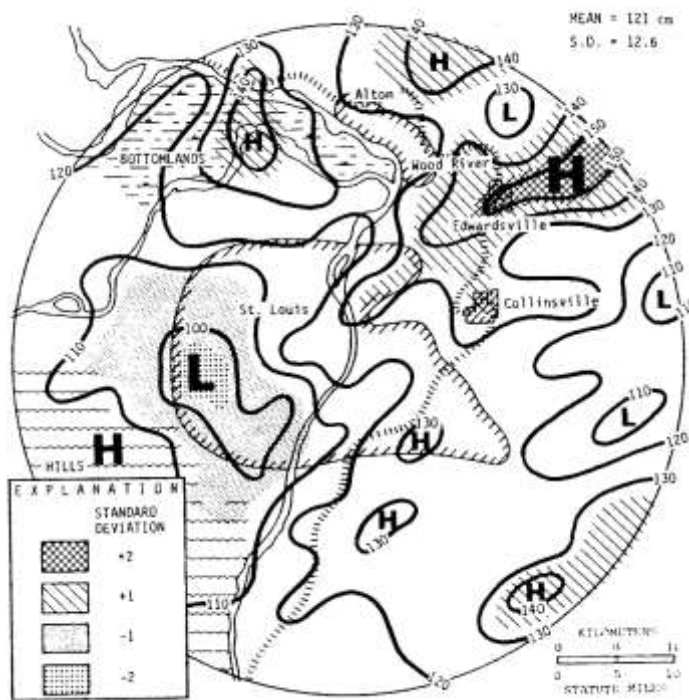


Abbildung 5-3: Gesamter Sommerniederschlag (cm), 1971-1975 in St. Louis (USA) (METROMEX, 1977: S. 14)

Während des METROMEX wurden die Niederschlagsverteilungen in und um St. Louis auch für die anderen drei Jahreszeiten betrachtet. Im Frühling und Herbst ist bei allen Niederschlagsintensitäten eine Leeanomalie feststellbar. Im Winter hingegen ergibt sich für Advektionsniederschläge eine Abnahme der Niederschläge. Auf das Minimum wurde nicht erklärend eingegangen, aber es wurde geschlossen, „[...] wenn die atmosphärische Dynamik am stärksten ist [...], ist der urbane Einfluss,

industrial complex, but the evidence was not consistent enough between the various wind-motion combinations to establish conclusive proof of the urban involvement.”

⁷ squall line

⁸ squall zone

die Niederschläge zu verändern, vernachlässigbar⁹ (Changnon Jr.; Shealy und Scott, 1991: S. 133)“. Diese Annahme ist in die Überlegungen zu den Experimenten nach der Jahreszeit, der Niederschlagsintensität und der Frontpassage in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin eingeflossen (siehe Kapitel 4.3, 4.6, 4.9), und konnte nicht bestätigt werden. Für Berlin zeigte sich besonders bei Schauerniederschlägen im Winter ein ausgeprägtes Leemaximum. Bei Frontalniederschlägen bildet sich ein deutliches innerstädtisches Minimum aus, das vermutlich durch die Eigenschaften der Stadt und ihre Auswirkungen auf die Atmosphäre hervorgerufen wird. Damit darf zu keiner Jahreszeit, selbst bei großräumig organisierter Niederschlagsentstehung, der Stadteinfluss unterschätzt werden.

5.2 Niederschlagsabschwächung bei Advektionsniederschlag

Hinweise auf eine niederschlagsvermindernde Wirkung von Stadtgebieten, wie sie für die Advektionsniederschläge in Berlin ermittelt wurden, wurden in verschiedenen Quellen in China veröffentlicht. Für die schnell wachsende Stadt Peking weisen Wang et al. (2009) darauf hin, dass aufgrund der sich verändernden Niederschlagsverteilung im Winter auch der Niederschlag aus stratiformer Bewölkung im Zusammenhang mit Tiefdruckgebieten genauer untersucht werden sollte. Sie haben selbst jedoch noch keine Erklärung gefunden. Kaufmann et al. (2007) untersuchten die klimatologische Antwort auf das schnelle Stadtwachstum im Perlflossdelta. Sie stellten dabei fest, dass in der sommerlichen Regenzeit die Monsunniederschläge zu intensiv sind, um eine Beeinflussung durch Städte nachweisen zu können. Für die Trockenzeit im Winter jedoch, wenn hauptsächlich Kaltfronten von Norden für die Niederschläge verantwortlich sind, stellen sie eine Niederschlagsverminderung im Stadtgebiet fest. Als Erklärungsansatz favorisieren sie die veränderten hydrologischen Verhältnisse in den versiegelten Gebieten und die damit einhergehende geringere Wasserdampfverfügbarkeit. Dieser Einfluss wird ihrer Ansicht nach durch den Aerosoleffekt verstärkt.

Als Aerosoleffekt können zwei verschiedene Auswirkungen auf die Niederschlagsbildung verstanden werden. Zum einen kann die von Rosenfeld (2000) festgestellte Niederschlagsverringerung durch eine aerosolbedingte Veränderung des Tröpfchenspektrums in Schichtwolken angenommen werden. Aufgrund von erhöhter Konzentration von kleinen¹⁰ Aerosolen in relativ sauberer Luft entstehen überwiegend kleine Wolkentropfen, jedoch kaum noch größere Niederschlagstropfen. Für Brisbane in Australien wies Bigg (2008) zum Beispiel einen signifikant abnehmenden Niederschlagstrend aus, der in seiner Argumentation einhergeht mit der zunehmenden Aerosolproduktion der Stadtbewohner. Heever und Cotten (2006) modellierten für den Fall der Aerosolzunahme eine Reduktion der Niederschlagshöhe um 5 bis 15 Prozent. Der zweite mögliche Einfluss von Aerosolen auf die Niederschlagsbildung

⁹ „[...] when the atmospheric dynamics are strongest, [...] urban influences sufficient to alter precipitation are negligible.“

¹⁰ cloud condensation nuclei - mit einem Radius von $10^{-1} \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$

basiert auf dem Eintrag von Riesenkernen¹¹. Riesenkerne und Eiskeime können die Initialbildung von größeren Wolkenelementen beschleunigen, die zu Niederschlagstropfen anwachsen können. Heever und Cotten ermittelten in ihrem Modell für erhöhte Konzentrationen der Riesenkerne eine Zunahme der Niederschlagshöhe von 15 bis 50 Prozent, abhängig von der Hintergrundkonzentration an Aerosolen. Allerdings weisen sie darauf hin, dass die Konvergenz durch die Wärmeinsel in ihrem Modell einen stärkeren Einfluss hat.

Für Berlin sind sowohl die verminderte Verfügbarkeit von Wasserdampf von der Erdoberfläche als auch die Aerosoleffekte als mögliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Die Luft von Berlin wies Mitte der Achtziger Jahre bis Anfang der Neunziger Jahre eine Gesamtstaubkonzentration von rund $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittelwert auf. In den folgenden zehn Jahren hat sich die Staubkonzentration in der Luft durch die eklatante Verringerung der Emissionen von genehmigungsbedürftigen Anlagen und Hausbrand insbesondere in Ostberlin und Ostdeutschland fast halbiert (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin, 2010). Die verfügbaren Informationen zur Partikelkonzentration ermöglichen keine Aussage darüber, ob es zu einer Verstärkung der Niederschläge in Berlin durch Riesenkerne oder zu einer Verringerung durch viele kleine Aerosole kommt. Die Option der urbanen Beeinflussung über Aerosoleintrag kann aber für Berlin nicht verworfen werden. Eine zeitliche Betrachtung der Niederschläge zur Überprüfung eines Aerosoleffektes wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Da die veränderte Aerosolkonzentration einen Einfluss auf die Niederschlagsentstehung insbesondere in Schichtwolken nimmt, kann die Auswirkung überwiegend in Lee der Stadt erwartet werden. Dieser Faktor kann deshalb nicht zur Erklärung des innerstädtischen Minimums bei Advektionsniederschlägen herangezogen werden.

Berlin wird als grüne Stadt bezeichnet mit seinen großen Grünanlagen, wie Tiergarten, Tempelhofer Feld oder dem Treptower Park, und den Stadtförsten in Tegel, Grunewald und Köpenick. Zirka ein Drittel (309 km^2) der Fläche Berlins ist den Landnutzungsklassen Grünfläche und Wald zugeordnet, abgeleitet aus den CORINE 2000 Daten (siehe Kapitel 3.2.7). Außerdem gibt es in Berlin vergleichsweise viele Straßenbäume. Ihre Anzahl stieg von 274.000 im Jahr 1950 auf 409.000 im Jahr 2000, das entspricht etwa 80 Bäumen pro Straßenkilometer (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2009). Dennoch sind große Teile des Stadtgebietes insbesondere innerhalb des S-Bahnringes stark versiegelt. Von den versiegelten Flächen wird das Niederschlagswasser schnell in die Kanalisation abgeleitet, was ein Verdunstungsdefizit in der Stadt zur Folge hat. Der daraus resultierende verringerte Feuchtenachschub von der Stadtoberfläche kann zu verminderter Niederschlagsbildung in den Wolken führen, wird aber auch erst bezogen auf die vorherrschende Luftbewegung in Lee feststellbar. Andererseits besteht die Möglichkeit, dass die geringere relative Luftfeuchtigkeit über großen, stark versiegelten Stadtgebieten erhöhte Verdunstung des Niederschlags beim Fallen durch die Stadtatmosphäre hervorruft. Damit sind die

¹¹ giant cloud condensation nuclei - mit einem Radius $> 1\mu\text{m}$

veränderten hydrologischen Verhältnisse in Berlin ein denkbarer Faktor für das direkt über der Stadt befindliche Niederschlagsminimum. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass anthropogener Wasserdampfeintrag in die Stadtatmosphäre durch Verbrennungsprozesse in Heizanlagen und in Autos sowie durch den Betrieb von Klimaanlage das Defizit zum Teil ausgleichen kann (Moriwaki et al., 2008). Unter bestimmten Bedingungen, besonders nachts, kann in der Stadt sogar ein Luftfeuchteüberschuss entstehen (Kuttler et al., 2007).

Der Einfluss von Städten auf Frontpassagen untersuchten Loose und Bornstein (1977) mit einem Anemometermessnetz. Sie stellten für New York fest, dass sich die Geschwindigkeit der Frontverlagerung über dem Stadtgebiet verlangsamt und hinter der Stadt wieder beschleunigt. Belger (1940) ist für fünf Fallbeispiele zu vergleichbaren Feststellungen mit Hilfe der umfangreichen und zeitlich hoch aufgelösten Regenschreiber der Berliner Wasserbetriebe gekommen. Allerdings führt die längere Verweildauer von Fronten über der Stadt aufgrund ihrer verringerten Geschwindigkeit seiner Erkenntnis nach zu einer Zunahme der Niederschlagshöhe im Stadtgebiet. Stulov (1993) bestätigt, dass bei sich schnell bewegenden Kaltfronten und Okklusionen, die über der Stadt gebremst werden, dort mehr Niederschlag fällt. Im klimatologischen Mittel konnte in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin keine Niederschlagszunahme nachgewiesen werden bei Frontpassage, sondern im Gegenteil eine Niederschlagsabnahme.

Schütz (1996) weist darauf hin, dass neben wolkendynamischen Prozessen, zum Beispiel thermisch erzwungener Konvektion, und wolkenmikrophysikalische Prozessen, wie der Aerosolkonzentration, auch Grenzschichtprozesse im Bezug auf die urbane Modifikation des Niederschlags berücksichtigt werden müssen. Als relevante Grenzschichtprozesse stellt er dynamische Tropfenselektion und inhomogene Tropfenevaporation heraus. Die strömungsmechanische Selektion entsteht durch den Einfluss der veränderten horizontalen Windgeschwindigkeiten auf unterschiedlich große Tröpfchen. Längere Verdunstungswege könnten dabei einer Niederschlagsverstärkung entgegenwirken. Aus einem Spektrum von Tröpfchen folgt ein Spektrum von Fallgeschwindigkeiten. Kleinere Tropfen könnten durch die intensivierte städtischen Aufwinde in der Schwebelage gehalten werden und verstärkt verdunsten, so dass weniger Niederschlag innerhalb des Stadtgebietes generiert wird. Eine ähnliche Überlegung bezüglich des verschobenen Übergangs von schwebenden Wolkenelementen zu fallendem Niederschlag durch intensivierte Aufwinde in der Stadt stellte bereits Reidat (1971) an. Im statistischen Mittel wirkt sich der Stadtkörper Berlins bei großräumig gesteuerter Niederschlagsentstehung, Frontalniederschläge, innerhalb des Stadtgebietes abschwächend aus. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Verminderung der Frontalniederschläge in Berlin über eine Beeinflussung des fallenden Niederschlags zwischen Wolke und Erdoberfläche hervorgerufen wird, wie es Schütz und Reidat postuliert haben.

Folgende Eigenschaften, als Ursache für eine niederschlagsvermindernde Wirkung der Stadtatmosphäre, können zusammengefasst werden:

- stärkere Verdunstung des Niederschlags durch geringere relative Luftfeuchtigkeit als Folge der höheren Temperaturen über der Stadt (UHI),
- stärkere Verdunstung des Niederschlags durch die häufig geringere absolute Feuchte in der Stadtgrenzschicht aufgrund des Verdunstungsdefizits an der Stadtoberfläche,
- stärkere Verdunstung des Niederschlags durch die verringerte Fallgeschwindigkeit der Niederschlagsselemente aufgrund stärkerer Turbulenz und höherer Geschwindigkeiten der aufsteigenden Vertikalbewegung und
- die strömungsmechanische Selektion unterschiedlich großer Tröpfchen aufgrund der veränderten horizontalen Windgeschwindigkeiten.

Die Verminderung der Niederschläge über Berlin tritt für Niederschläge an Fronten und damit übereinstimmend bei Regen und großräumig aufsteigender Luftbewegung, das heißt stark negativen Omegawerten, auf (siehe Abbildung 4-4, Abbildung 4-13). Unter diesen Bedingungen werden die Niederschlagsbildungsprozesse nicht durch den Untergrund determiniert, sodass nur die möglichen Auswirkungen der Stadtatmosphäre auf den fallenden Niederschlag feststellbar sind. Die einfaktorielle Betrachtung der Auswirkung der Wärmeinsel auf das Niederschlagsgeschehen zeigt keine Verminderung durch höhere Verdunstung. Dagegen hat die Konvektionsverstärkung auch für Regen einen großen Einfluss. Die Niederschlagsabnahme durch die geringere Luftfeuchtigkeit in der Stadtatmosphäre ist hingegen an Tagen mit geringen Niederschlagsintensitäten festzustellen (siehe Anhang 6-2). Besonders bei geringen Niederschlagsmengen, sowohl für Regen als auch für Schauer, ist die Bedeutung des Verdunstungsverlustes zwischen Wolke und Erdboden relevant. Das derart bedingte Stadtminimum tritt bei höheren Niederschlagssummen nicht mehr in Erscheinung. Übertragbar ist diese Argumentation auf Tage mit geringen Windgeschwindigkeiten. Bei schwachen Winden entsteht ein Stadtminimum, das durch die zunehmende Bedeutung der verstärkten Turbulenz über der Stadt mit ausgelöst worden sein kann (siehe Anhang 8-1 und Anhang 8-4).

5.3 Orographieeffekt

Reidat (1971) verwies in der über zehn Jahre reichenden Untersuchung von starken Niederschlägen über Hamburg außerdem darauf, dass an Gewittertagen ein Einfluss der Orographie auf die räumliche Verteilung nicht sichtbar ist, während an Tagen mit starken Niederschlägen ohne Gewitter deren Einfluss deutlich zu erkennen ist. Die orographischen Einflüsse auf die räumliche Verteilung der Niederschläge in Berlin wurden mehrfach herausgestellt (Graf und Gräfe, 1979; Hendl, 1969; Schlaak, 1977). In der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin wurde, bei der windrichtungsabhängigen Betrachtung der Niederschläge, ein möglicher Hinweis auf eine Niederschlagszunahme nur am Südwesthang des Barnims sichtbar. Aus dem möglichen Einfluss der Hochfläche des Barnims ergibt sich eine Unsicherheit für die Ausweisung einer städtischen Leeanomalie aus der Verteilung der mittleren Jahressummen in Berlin. Diese Grundmoränenplatte erstreckt sich über den nord-nordöstlichen Teil Berlins und darü-

ber hinaus. Bezogen auf die dominierenden Windrichtungen Südwest und West befindet sich der Barnim damit genau im Leebereich der Stadt. Der maximale Höhenunterschied erstreckt sich über ca. 120 m vom Stadtzentrum im Berliner Urstromtal, mit 35 m NN, bis zum Semmelberg, mit einer Höhe von 157 m NN, am nordöstlichen Rand des Barnims. Für die fünf Windrichtungsklassen, von West über Süd nach Ost, ist eine positive Niederschlagsanomalie auf dem Barnim unabhängig von der großräumigen Verteilung der Niederschlagshöhe zu erkennen. Für 15 Prozent aller Regentage mit Nordwest-, Nord- und Nordostanströmung ist hingegen kein relatives Maximum festzustellen. Bei der windrichtungsabhängigen Niederschlagsunterscheidung an Tagen ohne Frontdurchgang erstreckt sich über dem Barnim bei fast allen Windrichtungen eine positive Gebietsanomalie, trotz des sich über die Richtungsklassen verschiebenden Niederschlagsschwerpunktes im Untersuchungsgebiet. Wiederum tritt auch an den Tagen mit Frontpassage aus den drei Nordsektoren kein relatives Maximum auf dem Barnim auf. Diese Differenzierung könnte ein Indiz für einen windrichtungsabhängigen, niederschlagsteigernden Einfluss dieser Reliefform sein. Quantitativ kann der Zunahmeeffekt durch die Niederschlagsklimaanalyse-Berlin nicht erfasst werden; es ist anzunehmen, dass es zu einer Überlagerung mit Stadteffekten kommt. Diese geringen orographischen Unterschiede sollten also bei der Interpretation der Verhältnisse mit dominierenden Südwest- und Westwinden nicht vernachlässigt werden. Allerdings treten andere Reliefvollformen innerhalb des Untersuchungsgebietes nicht in gleichem Maße markant in Erscheinung. Durch die Lage des Maximums der urban verstärkten, konvektiven Niederschläge überwiegend im Nordosten Berlins ist eine Überlagerung mit der orographischen Verstärkung am Barnim möglich.

5.4 Konvektionsverstärkung

Wie bereits oben aufgeführt, ist die Verstärkung von konvektiven Niederschlägen durch die zusätzliche Energie der Wärmeinsel vieler Städte ausgewiesen worden. Modellierungen eines starken Konvektionsereignisses in Peking von Guo et al. (2006) zeigten die dabei ablaufenden Veränderungen bei der Konvektion. Die Wolken entstehen etwas früher, aber nach der städtischen Modifikation sind sie wenig stark gewachsen und stärker verteilt. Die geringere Luftfeuchtigkeit führt dazu, dass die Wolkenuntergrenze höher liegt und die vertikale Erstreckung geringer ist, wodurch weniger mächtige, nicht niederschlagsträchtige Cumulus-Wolken entstehen. Dabei zeigt sich, dass die Konvektion an der Oberseite der Wolke schwächer ist, an der Unterseite bedingt durch die Untergrundrauigkeit aber stärker. Bezogen auf die Schauerzugbahn berechneten Gou et al., dass die Stadt ein Hindernis darstellt, um das die Zellen herum ziehen und in Lee zusammentreffen, wo sie verstärkte Niederschläge bilden. Dieses Verhalten konnte ebenfalls von Bornstein und LeRoy (1990) für Gewitter in New York empirisch festgehalten werden. Die Niederschläge verlagern sich so vom Stadtgebiet in den Leebereich. Shem und Sheperd (2009) stellten in ihren Modellierungen von zwei Tagen mit Schauerniederschlägen in Atlanta fest, dass sich an den Übergängen von der Stadt zum Umland, insbesondere in Lee, konver-

gente Strömungen im unteren Bereich der Troposphäre ausbilden, aber nicht über der Stadt direkt. Die Konvergenz muss nicht direkt zu Niederschlägen vor Ort führen.

In dem Modell von Shem und Sheperd zeigt sich außerdem, dass der Einfluss auf die Zirkulation am Tag ausgeprägter ist, obwohl die Wärmeinsel sich meist abends und nachts stärker ausbildet. Ähnlich verhält es sich bei der Betrachtung der Schauer in Berlin, die ein ausgeprägtes Maximum in Lee nicht im Sommer mit häufig auftretenden Wärmeinseln in der Stadt ergeben, sondern unter den Winterverhältnissen (siehe Anhang 5-2). Damit ist aber nicht festgestellt, dass die Wirkung der Wärmeinsel im Sommer nicht vorhanden ist. Dass von einer UHI eine Intensivierung der Niederschlagsbildung ausgeht, zeigt sich an dem auftretenden Stadtminimum bei Fehlen derselben (siehe Anhang 5-3). Es kommt zu einer Leeverstärkung für Regenniederschläge an Tagen mit Wärmeinsel (siehe Anhang 5-5 und Anhang 5-6). Vielmehr ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Rahmenbedingungen im Winter eine große Wirksamkeit der UHI ermöglichen. An Tagen mit labiler Schichtung im Winter, zum Beispiel bei Einströmen kalter Luft über einen ausgekühlten Untergrund, kann das Fehlen von warmer, vom Boden aufsteigender Luft der limitierende Faktor für Konvektionsniederschläge sein. Durch die lokal begrenzte, zusätzliche Wärme über der Stadt könnte die benötigte Energie in die Konvektionswolke eingetragen werden, die die Niederschlagsbildung erst auslöst. Aus dem möglichen, räumlich begrenzten Überwinden der Einschränkung der Niederschlagentstehung ergibt sich eine klar der Stadt zuordenbare Niederschlagszunahme in Lee. Die Unterscheidung der Niederschlagsverhältnisse für Klassen der Vertikalbewegung untermauert diese Annahme. Je ungünstiger die Verhältnisse für die Niederschlagsbildung sind, umso stärker kommt ein Stadtmaximum zum Vorschein. Bei großräumig leicht absinkender Luftbewegung ist die urbane Verstärkung erkennbar, während sich bei verbreiteter Hebung ein Stadtminimum und ein Maximum im Nordwesten ausbilden.

Im Sommer ergeben sich mögliche Limitierungen der Konvektion weniger durch die Erdoberflächentemperatur, sondern eher durch die Stabilitätseigenschaften der freien Atmosphäre und/oder die Wasserverfügbarkeit in dieser. Das könnte eine Ursache sein, warum im Durchschnitt keine urban induzierte Änderung im Niederschlagsfeld bei durchschnittlicher Schauerintensität erkennbar ist. Für intensive Einzelereignisse wiederum zeigt sich genau das Gegenteil. An sommerlichen Schauertagen mit überdurchschnittlich hohen Niederschlagssummen, über 30 Millimeter am Tag, entwickelt sich eine Maximumzone in Lee und über der Stadt (siehe Anhang 7-4 bzw. Abbildung 4-10). Daraus könnte gefolgert werden, dass beim Wegfall der Beschränkungen in der Atmosphäre, beziehungsweise wenn die Voraussetzungen für Konvektion besonders gut sind, im Sommer die zusätzliche Energie durch die Stadt wiederum eine Intensivierung der Niederschlagsbildung hervorruft.

Für die Klasse der starken Schauer liegt das städtisch verstärkte Maximum nicht nur außerhalb des Stadtgebietes sondern auch direkt in der Stadt. Die IDC weist eine sehr geringe mittlere Windgeschwindigkeit von 4,7 m/s auf und die Windrichtungsverteilung wird nicht vom Südwestsektor dominiert. Bezogen auf die Frage der verschiedenen Positionen von urbaner Niederschlagsverstärkung,

führt vermutlich diese Kombination von Winden aus verschiedenen Richtungen mit geringen Windgeschwindigkeiten zu dieser Verlagerung beziehungsweise Ausweitung des Niederschlagsmaximumgebietes vom Bereich des klimatologischen Lee der Stadt in das Stadtgebiet selbst. Ein urban verstärktes Niederschlagsmaximum nimmt an Tagen ohne Frontdurchgang dementsprechend eine andere Lage im Untersuchungsgebiet ein als an Schauertagen. Der Wind weht an 35 Prozent der Tage ohne Frontdurchgang nicht aus dem Südwestquadranten und hat eine mittlere Geschwindigkeit von 7,1 m/s. An Schauertagen beträgt die mittlere Geschwindigkeit 8,3 m/s und nur knapp 20 Prozent aller Tage haben eine Windrichtung verschieden von West bis Süd. Für die IDC der Schauer ergibt sich im ACAT-Diagramm ein schwaches Leemaximum im Nordosten Berlins (siehe Abbildung 4-3) während die IDC der Tage ohne Frontdurchgang ein ausgeprägtes innerstädtisches Maximum zeigen (siehe Abbildung 4-14).

5.5 Windeinfluss

Entsprechend der geographischen Lage des Untersuchungsgebietes in der zyklonal geprägten Westwindzone ergibt sich, abgesehen von lokalen Schauerböen, ein positiver Zusammenhang zwischen zunehmenden Windgeschwindigkeiten und der ansteigenden Häufigkeit von Winden aus dem Südwestquadranten. Bei Winterschauern weht der Wind fast ausschließlich aus dem Südwestquadranten durchschnittlich mit 12 m/s. Für diesen Fall hat sich in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin das markanteste Leemaximum ergeben (siehe Anhang 3-2). Die IDC der überdurchschnittlichen Windgeschwindigkeiten von mehr als 9 m/s weisen ebenfalls ein ausgeprägtes Maximum in Lee der Stadt auf, ebenso wie die IDC der Regentage respektive die IDC der Fronttage mit hohen Windgeschwindigkeiten (siehe Anhang 8-6 und Anhang 13-3). Bei advektiven Niederschlägen mit hohen Windgeschwindigkeiten bildet sich ein Leemaximum aus, welches ein Indiz dafür sein könnte, dass die erhöhte Oberflächenrauigkeit der Stadt bei hohen Windgeschwindigkeiten niederschlagsverstärkende dynamische Turbulenz hervorruft.

Name: **Südwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 202,5° und 247,5° lag

Fallzahl: 4109 mittlere Gesamtsumme: 9959 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 35 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm

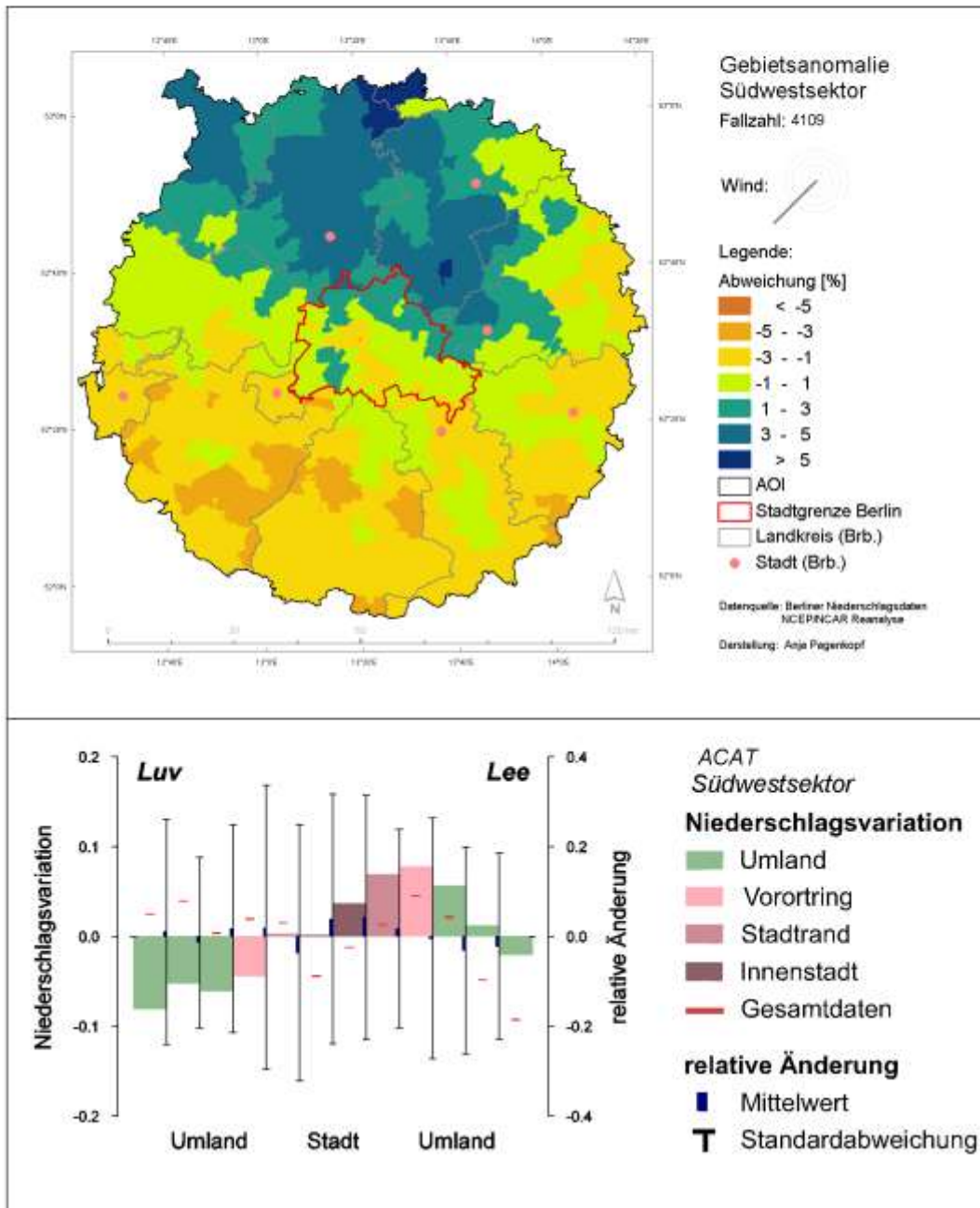


Abbildung 5-4: Übersichtsblatt der IDC Tage mit Wind aus dem Südwestsektor

Name: **Nordwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 292,5° und 337,5° lag

Fallzahl: 790 mittlere Gesamtsumme: 1903 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 6,7 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm

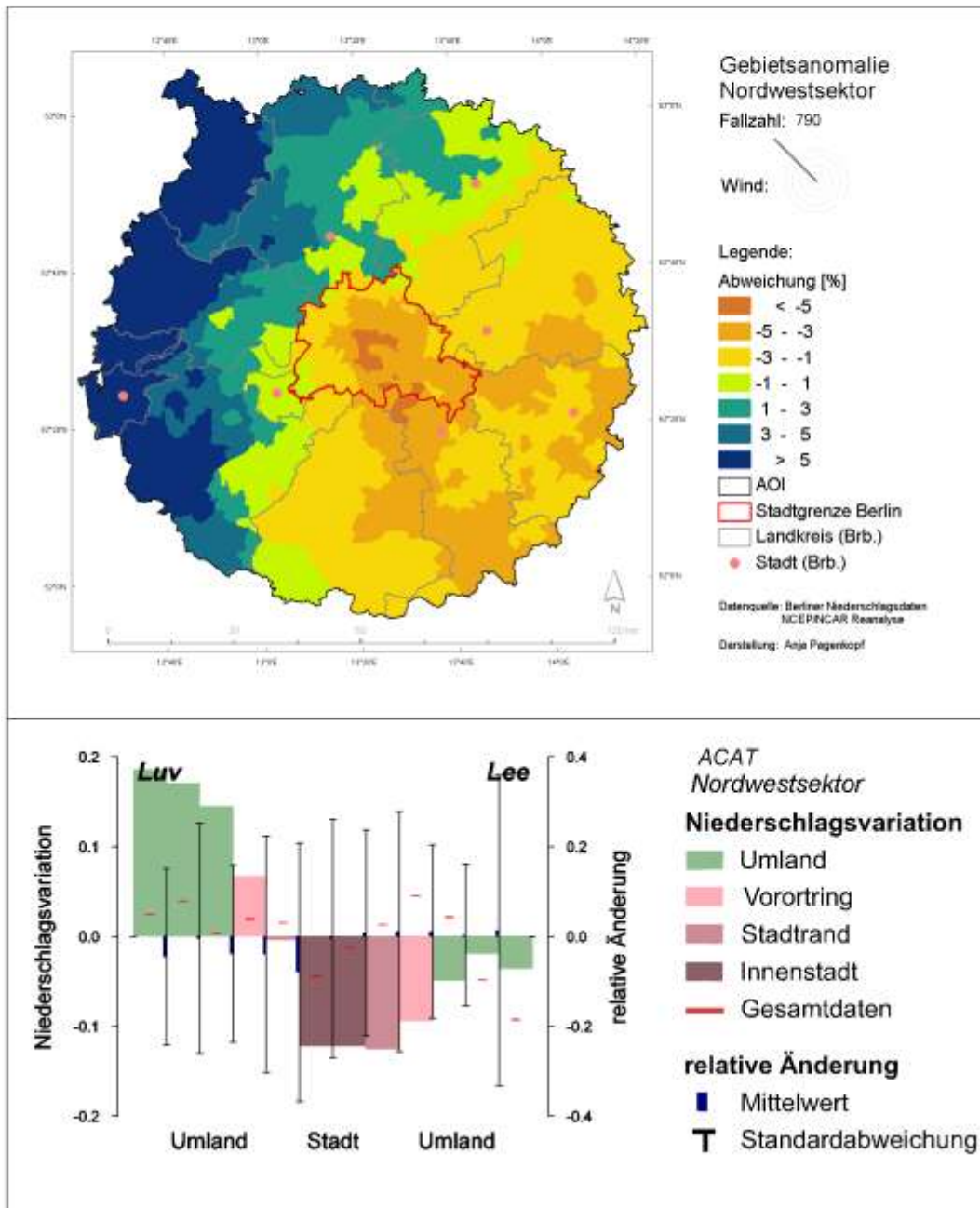


Abbildung 5-5: Übersichtsblatt der IDC Tage mit Wind aus dem Nordwestsektor

Die windrichtungsabhängige Betrachtung der Niederschläge im Untersuchungsgebiet gibt keinerlei Hinweise auf urban modifizierten Niederschlag (UIP). Vielmehr bestimmt die Windrichtung die übergeordnete Zugbahn der Niederschlagsfelder und damit die regionale Anordnung von Zonen höherer und niedrigerer Niederschläge. Eine Unterscheidung nach Tagen mit und ohne Frontdurchgang ergibt nur geringfügige Abweichungen in den sehr dominanten, auf die Windrichtung bezogenen Niederschlagsstrukturen ohne Stadteinfluss. In den Fällen von Wind aus dem Südwest- oder Nordostsektor ergibt sich aus der großräumigen Niederschlagsstruktur ein Leemaximum bezogen auf die Stadt (siehe Abbildung 5-4), bei Wind aus dem Nordwest- oder Südostsektor hingegen ein Luvmaximum (siehe Abbildung 5-5). Diese windrichtungs determinierte Anordnung der Niederschläge gilt es bei der Interpretation des urbanen Leemaximums von Berlin bei vorherrschenden Südwestwinden zu berücksichtigen. Es war nicht möglich, zu vergleichbaren Erkenntnissen über die überregionalen Niederschlagsverhältnisse mit Hilfe der Klassifizierung nach Großwettertypen zu gelangen.

5.6 Bedeutung und Gegenüberstellung der atmosphärischen Einflussfaktoren für die Niederschlagsverteilung

Mit der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin konnte bestätigt werden, dass sich die Niederschlagsmodifikation im urbanen Raum Berlin erkennbar von der im ruralen Umland unterscheidet. Der Stadtkörper übt einen systematischen Einfluss auf die Niederschlagsbildung in zwei wesentlichen Ausprägungen aus. Anhand der Gegenüber- und Zusammenstellung von Ergebnissen der verschiedenen Experimente wird die Bedeutung der Einflussfaktoren für den *Urban Induced Precipitation (UIP)* abgeschätzt.

Durch die Klassifizierung der Niederschlagstage nach der Windrichtung werden die wesentlichen regionalen Strukturen des Niederschlagsfeldes abgebildet. Diese besondere Bedeutung der Windrichtung für die Ausbildung unterschiedlicher großräumiger Strukturen spiegelt sich in den Niederschlagsverteilungen mehrerer IDC wider, bei denen eine Windrichtung besonders deutlich dominiert. Dies gilt zum Beispiel in der Klasse ‚hohe Windgeschwindigkeiten‘, die fast ausschließlich durch Südwestwind gebildet wird, oder in der Klasse ‚extreme Advektionsniederschläge‘, die überwiegend durch Südostwinde gekennzeichnet ist. Auch der orographische Einfluss der Grundmoränenplatte Barnim auf die Niederschlagsverteilung wird windrichtungsabhängig unterschiedlich wirksam. Für knapp 17 Prozent der Niederschlagstage, mit Winden aus dem nördlichen Quadranten (NW, N, NE), ist das regelmäßig auftretende orographische Niederschlagsmaximum auf dem Südwestanstieg des Barnim nicht feststellbar. Bei einer Analyse der städtischen Leeanomalie Berlins muss dementsprechend berücksichtigt werden, dass der Bereich möglicher Konvektionsverstärkung im nordöstlichen Umfeld der Stadt räumlich sowohl mit der orographischen Niederschlagszunahme am Barnim als auch mit der übergeordneten Niederschlagsstruktur der häufigsten südwestlichen Winde überlagert sein kann.

Die Experimente über die Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und räumlicher Entfernung der urban verstärkten Niederschläge vom Stadtzentrum haben für die drei unterschiedenen Windge-

schwindigkeitsklassen keinen Zusammenhang geliefert. Die Lage des urban induzierten Konvektionsmaximums bezogen auf das Stadtgebiet entsteht durch die kombinierte Wirkung aus Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Für Schauertage, die durch häufige und relativ starke Südwestwinde charakterisiert sind, ergibt sich ein Niederschlagsmaximum im Leebereich der Stadt und im angrenzenden Umland. Je geringer die Windgeschwindigkeit und je größer die Variabilität der Windrichtung ist, um so mehr wird aus der klassischen urbanen Leeanomalie eine Niederschlagszunahme über dem Stadtgebiet selbst. Dies wird an Tagen ohne Frontenpassage besonders deutlich. Da jedoch die Windgeschwindigkeitsklassifizierung in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin eng mit der Windrichtung verknüpft ist, bestimmt sie die räumliche Anordnung der Niederschläge indirekt stärker als es durch die Unterscheidung der Niederschlagstypen oder der Frontpassage erfolgt.

Der Vergleich der räumlichen Verteilungen des zweifaktoriellen Experimentes ‚Niederschlagstyp und Frontpassage‘ mit den jeweiligen einfaktoriellen Experimenten zeigt, dass es eine stärkere Korrelation der Niederschlagsverteilung zu den IDC bezüglich der Frontpassageklassen besteht als zu den IDC der Niederschlagstypen. Insbesondere fällt die unterschiedliche Lage der Zone der Konvektionsverstärkung in den IDC ‚Tage ohne Fronten‘ und ‚Schauerniederschläge‘ ins Gewicht, da das Stadtminimum und das Niederschlagsmaximum im Nordwesten den IDC ‚Frontniederschlägen‘ und ‚Regen‘ gemeinsam ist. Die jeweilige Ausprägung des UIP ist dabei nicht abhängig von der Niederschlagsintensität, die räumlichen Niederschlagsverteilungen der Intensitätsklassen jedoch werden indirekt vom Niederschlagstyp bestimmt.

In dem zweifaktorielle Experiment ‚Frontpassage und Jahreszeiten‘ wird für die Niederschlagsverteilung der ‚Tage mit Fronten im Winter‘ eine abweichende Verteilung bezogen auf die Niederschlagsverteilung der ‚Tage mit Fronten‘ erfasst. In diesem Fall ist die Niederschlagshöhe in Lee der Stadt größer als das sonst vorkommende Maximum im Nordwesten. Diese Anordnung kann durch die größere Bedeutung der konvektiven Niederschläge an Kaltfronten im Winter bedingt sein, ist aber auch über die größere Häufigkeit der Südwestwinde erklärbar. Eine Niederschlagsverstärkung durch den Einfluss des Stadtkörpers wird in der Darstellung der Niederschlagsverteilung besonders deutlich, wenn ungünstige Rahmenbedingungen für Konvektion vorliegen. Die räumlichen Verteilungen der Schauerniederschläge in den zwei Jahreszeiten haben jeweils einen unterschiedlichen Charakter, wobei sich nur im Winter ein deutliches Leemaximum ausbildet. Die zusätzliche Unterscheidung bezüglich der Existenz einer städtischen Wärmeinsel ergibt keine weitere Differenzierung der Niederschlagsverteilungen der Schauer. Für Regenniederschläge hingegen hat das Vorliegen einer positiven UHI einen größeren Einfluss auf die räumliche Niederschlagsstruktur als die Unterscheidung in Sommer und Winter.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass das regionale Niederschlagsklima im Untersuchungsgebiet am ausgeprägtesten über die Informationen zur Windrichtung beschrieben wird. Unter Fronteinfluss und bei advektiven Niederschlägen manifestiert sich urbanes Lokalklima durch ein Nie-

erschlagsminimum in dem regionalen Nordwest-Südost-Trend. An Niederschlagstagen mit Schauern oder ohne Frontpassage entsteht durch Winddrift ein fließender Übergang zwischen urbanem Lokalklima und urban beeinflusstem Lokalklima im Umland. Die zusätzlich in dieser Arbeit betrachteten atmosphärischen Faktoren lassen die genannten Effekte zum Teil stärker hervortreten oder bekräftigen ihre Aussage.

6 Ausblick

Mit der durchgeführten Niederschlagsklimaanalyse-Berlin wurde die urbane Niederschlagsmodifikation für 17 Kombinationen von Wetterfaktoren untersucht. Weiterführende Analysen mit ergänzenden atmosphärischen Faktoren und Faktorkombinationen könnten durchgeführt werden. Anregungen aus weiteren Prozessstudien können dabei in die Konzeption neuer Experimente aufgenommen werden.

Die in der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin abgeleiteten Schlussfolgerungen sollten für vergleichbare Städte, für die ähnlich umfangreiche Daten verfügbar sind, mit Hilfe der gleichen Untersuchungsmethode verifiziert werden. Als weiterer Schritt könnte das konzeptionelle Vorgehen dieser Arbeit und den daraus resultierenden Ergebnisse für das Berliner Gebiet mit den Konzepten und Ergebnissen von Stadtklimamodellen verglichen werden.

Das erarbeitete methodische Vorgehen wurde so aufbereitet, dass mit den halbautomatisch einsetzbaren Software-Werkzeugen weitere Fallstudien durchgeführt werden können. Eine ausreichende Datengrundlage vorausgesetzt, sind Untersuchungen für urbane Anwendungsgebiete mit anderen Randbedingungen, sowohl in anderen Klimazonen als auch mit deutlich unterschiedlichen orographischen oder urbanen Charakteristika, realisierbar und von wissenschaftlichem Interesse.

Der geschaffene synthetische Gebietsniederschlagsdatensatz für das Untersuchungsgebiet Berlin und die angrenzende Region des Bundeslandes Brandenburg bietet die Möglichkeit, kleinräumige, adressierbare Untersuchungen zu nicht rein stadtklimatologischen Fragestellungen auszuführen. Vorstellbar sind zum Beispiel räumliche Extremwertanalysen beziehungsweise flexible Koppelungen mit hydrologischen oder ökologischen Modellen.

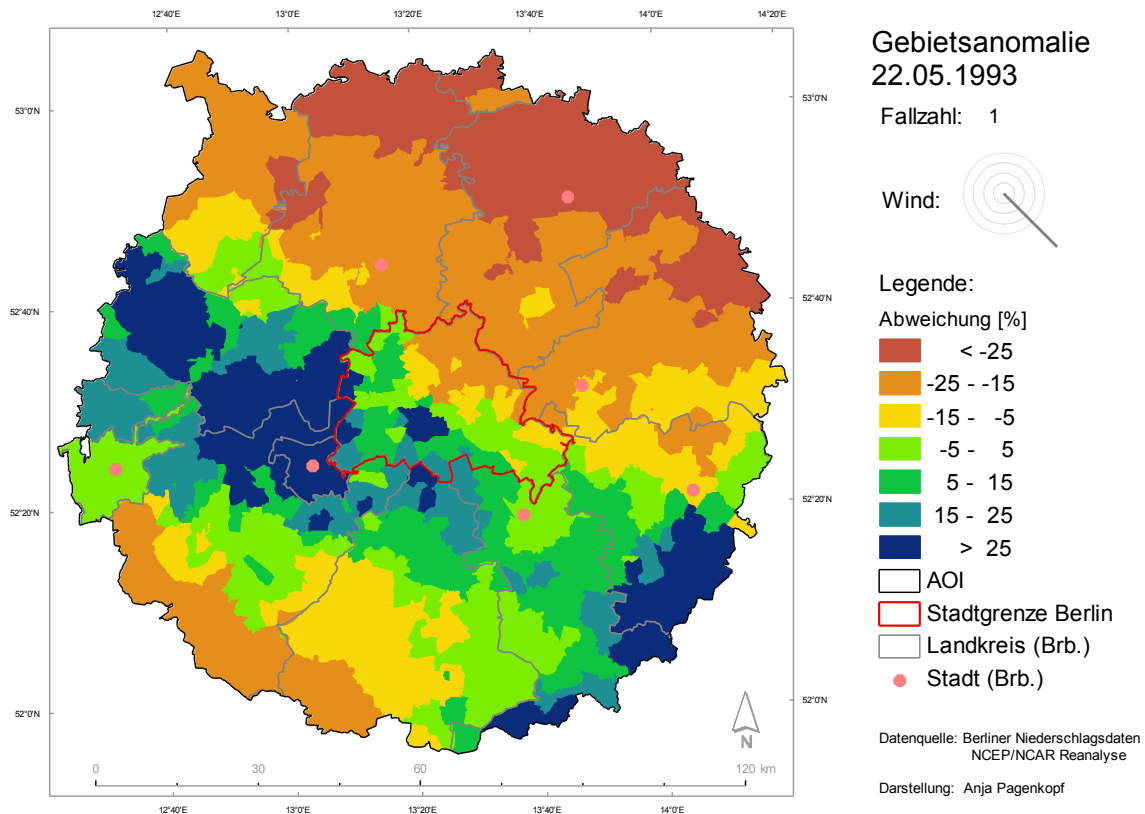
Die in dieser Arbeit verwendete methodische Vorgehensweise zur Auswertung empirischer Daten kann als Grundlage für die Evaluierung des Stadteinflusses auf Niederschläge in numerischen Klimamodellen verwendet werden. Durch die wetterspezifische Auswertung der Niederschlagsdaten könnten die Ergebnisse mit Simulationsensembles verglichen werden, die mit ähnlich konstruierten Modellkonfigurationen durchgeführt werden. Es sollte weiterhin überprüft werden, inwieweit die Ergebnisse der Niederschlagsklimaanalyse-Berlin für die Parametrisierung oder zukünftige Weiterentwicklungen von Stadtklimamodellen verwendet werden können.

7 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Analyse des Niederschlagsklimas der Stadt Berlin und des Umlandes im Bundesland Brandenburg wird an bisherige stadtklimatologische Untersuchungen zur Existenz einer urbanen Lee-Anomalie angeschlossen (Lowry, 1998; Shepherd, 2005). Insbesondere werden klimatologisch signifikante räumliche Strukturen der Niederschlagsverteilung untersucht, die durch Wirkung des urbanen Raumes verursacht werden. Dafür steht ein Datensatz mit Tagessummen der Niederschlagshöhe über den Untersuchungszeitraum von 1951 bis 2000 zur Verfügung. Der Radius des kreisförmigen Untersuchungsgebietes beträgt 60 Kilometer vom Alexanderplatz im Stadtzentrum Berlins. Für die Analyse werden Primärdaten von 247 Niederschlagsmessstationen aus dem erweiterten Interpolationsbereich zwischen 51,5° und 53,5° nördlicher Breite sowie 12° und 15° östlicher Länge verwendet. Von 160 Stationen sind Datenreihen für mehr als 60 Prozent der Niederschlagstage im Untersuchungszeitraum verfügbar.

Die Übertragung der gemessenen Niederschlagshöhen in die Analysefläche erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die räumliche Verteilung der Niederschlagshöhe aus den Stationsdaten für jeden der ausgewiesenen 11848 Niederschlagstage auf ein 1km-Raster interpoliert. Im zweiten Schritt werden aus diesen Rasterdaten mittlere Gebietsniederschläge für Analysegebiete berechnet. Das flächendeckende Basismodell der Analysegebiete ist aus 636 administrative Teilflächen, den Stadtteilen Berlins und den Gemeinden Brandenburgs, aufgebaut (\varnothing 20 km²). Für die dynamischen Analysen werden die Gebietsniederschlagshöhen entlang eines zur mittleren Windrichtung jedes Niederschlagstages parallelen Transektes berechnet, bestehend aus zwölf 10 x 10 km großen Quadraten durch das Untersuchungsgebiet. Die Niederschlagsverteilungen der einzelnen Tage bilden aufbereitet zu Karten der relativen Gebietsanomalie die primären Objekte aller weiterführenden Analysen (siehe Karte 7-1). Die Darstellung der relativen Gebietsanomalie versteht sich als prozentuale Abweichung der Teilgebietsmittel vom Gesamtgebietsmittel und ist notwendig für die Vergleichbarkeit und Aggregation der täglichen räumlichen Unterschiede unabhängig von absoluten Niederschlagshöhen.

Erzeugung, Verwaltung und Verarbeitung der Analyseobjekte werden in einem teilautomatisierten Workflow organisiert, der überwiegend scriptbasiert im geographischen Informationssystem ArcGIS 9.3 realisiert wird. Die Eingangs- und Ergebnisdaten werden in einer SQL Datenbank (ACCESS) verwaltet. Weitere Verarbeitungsschritte werden scriptbasiert mit Microsoft Excel und dem Statistikpaket R durchgeführt.



Karte 7-1: Beispiel für ein Analyseobjekt - Karte der relativen Gebietsanomalie vom 22.05.1993 mit einem Gesamtgebietsmittelwert von 9,1 mm

Die Analyseobjekte werden als unabhängige Versuche in verschiedenen geostatistischen Experimenten zusammengefasst, mit denen nach Einflüssen von großen urbanen Ballungsräumen auf das Niederschlagsgeschehen, differenziert nach verschiedenen atmosphärischen Randbedingungen, gesucht werden soll. Unter Verwendung von acht klassifizierten Atmosphärenparametern wurde ein Rahmen für die Quantifizierung der klimatologischen Randbedingungen und Wetterverhältnisse aufgespannt. Für 17 ausgewählte Kombinationen dieser Atmosphärenparameter wurde der Niederschlagsdatensatz in teilweise überlappende geostatistische Experimente gruppiert.

Die Datengrundlage für die Angaben zu den täglichen Eigenschaften der Atmosphärenparameter besteht aus Beobachtungsdaten von der Wetterstation Berlin-Tempelhof des Deutschen Wetterdienstes, Modeloutput aus dem NCEP/NCAR Reanalysedatensatz sowie Wetterkartenanalysen des Meteorologischen Instituts der Freien Universität Berlin. Zur Beschreibung der Landoberfläche wurden die Landnutzungs- und Landbedeckungsdaten von CORINE 2000 herangezogen. Das benötigte Reliefmodell des Untersuchungsgebietes wurde aus dem digitalen Höhenmodell DEM90 der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) extrahiert.

Unter Verwendung der Analyseobjekte ist das Niederschlagsklima im Untersuchungsgebiet durch Tagessummen mit einem Median von 1,2 mm und einem Maximum von 103 mm charakterisiert. Für die

weitergehende Auswertung und Interpretation der Experimente werden die Analyseobjekte zu Mittelwertkarten zusammengefasst. Bezogen auf die Niederschlagshöhe erreicht die Spannweite in den Mittelwertkarten der einzelnen Experimente in der Regel bis zu 10 Prozent des Kartenmittels.

Der regionalklimatologisch dominierende Faktor für die Herausbildung unterscheidbarer räumlicher Niederschlagsverteilungen im Untersuchungsgebiet ist die Windrichtung in der unteren Troposphäre. Diese besondere Bedeutung der Windrichtung für die Ausbildung unterschiedlicher großräumiger Strukturen spiegelt sich in den Niederschlagsverteilungen derjenigen Experimentklassen wider, in denen eine Windrichtung besonders deutlich dominiert. Dies gilt zum Beispiel in der Klasse ‚hohe Windgeschwindigkeiten‘, die fast ausschließlich durch Südwestwind gebildet wird, oder in der Klasse ‚extreme Advektionsniederschläge‘, die überwiegend durch Südostwinde gekennzeichnet ist.

Die von (Graf und Gräfe, 1979; Malberg und Frattesi, 1990; Schlaak, 1977) ausgewiesene orographische Niederschlagszunahme auf dem Barnim wird windrichtungsabhängig unterschiedlich wirksam. Nur für knapp 17 Prozent der Niederschlagstage, mit Winden aus dem nördlichen Quadranten (NW, N, NE), ist das regelmäßig auftretende orographische Niederschlagsmaximum auf dem Südwestanstieg des Barnims nicht feststellbar. Weil die großräumige Gliederung sehr stark ausgeprägt ist, konnte in diesem Experiment kein städtischer Einfluss auf die Niederschlagsverteilung festgestellt werden.

In einigen anderen Experimenten hingegen gelingt der Nachweis städtischer Modifikationen von zwei unterschiedlichen Typen (siehe Tabelle 7-1). Für die Mehrheit der Tage, an denen der Niederschlag als ‚Schauer‘ fällt, kann eine positive Leeanomalie bestätigt werden. An diesen Tagen tritt, bei überwiegender Winden aus dem Südwestquadranten, in der mittleren Niederschlagsverteilung eine Maximumzone im Norden und Nordosten Berlins auf. Im Stadtgebiet und im Osten des Untersuchungsgebietes, an der Oder, erstrecken sich Bereiche mit geringeren Werten. Bei einer Analyse der städtischen Leeanomalie Berlins muss berücksichtigt werden, dass der Bereich möglicher Konvektionsverstärkung im nordöstlichen Umfeld der Stadt räumlich sowohl mit der orographischen Niederschlagszunahme am Barnim als auch mit der übergeordneten Niederschlagsstruktur der häufigsten südwestlichen Winde überlagert sein kann.

Bei jahreszeitlich unterschiedener Betrachtung der ‚Schauerniederschläge‘ tritt eine Verstärkung im Winter klarer zum Vorschein als im Sommer, bedingt durch die im Winter häufiger auftretenden SW-Winde sowie durch im Vergleich zum Sommer weniger intensiv und häufig entstehende Konvektionsniederschläge. Eine ebenfalls zunehmende Häufigkeit der SW-Winde oder die im Stadtgebiet Berlins besonders hohe Stationsdichte führen dazu, dass sich die Zone positiver Gebietsanomalie an ‚Schauertagen mit höherer Niederschlagsintensität‘ über der Stadt stärker ausprägt. Die Lage des urban induzierten Konvektionsmaximums bezogen auf das Stadtgebiet resultiert aus der kombinierten Wirkung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Für ‚Schauertage‘, die durch häufige und relativ starke Südwestwinde charakterisiert sind, ergibt sich ein Niederschlagsmaximum im Leebereich der Stadt und im angrenzenden Umland. Je geringer die Windgeschwindigkeit und je größer die Variabilität der

Windrichtung ist, um so mehr wird aus der klassischen urbanen Leeanomalie eine Niederschlagszunahme über dem Stadtgebiet selbst, zum Beispiel an ‚Tagen ohne Frontpassage‘. Obwohl eine vermutete räumliche Verschiebung der Leeanomalie in Windrichtung durch die einfaktorielle Betrachtung der mittleren Niederschlagsverhältnisse für drei Windgeschwindigkeitsklassen nicht bestätigt werden konnte, ergeben sich windgeschwindigkeitsabhängig unterscheidbare räumliche Strukturen. Dies ist auf den engen Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeitsklassifizierung und der Windrichtung zurückzuführen.

Tabelle 7-1: Übersicht der Experimente mit einer Zuordnung zu den zwei festgestellten Typen der urbanen Niederschlagsmodifikation

| urban bedingte Niederschlagsverstärkung | urbane Niederschlagsverminderung |
|--|--|
| <i>Klasse:</i> Schauer <i>Experiment:</i> Niederschlagstyp | <i>Klasse:</i> Regen <i>Experiment:</i> Niederschlagstyp |
| <i>Klasse:</i> ohne Fronten <i>Experiment:</i> Frontpassage | <i>Klasse:</i> mit Fronten <i>Experiment:</i> Frontpassage |
| <i>Klasse:</i> hohe Intensität <i>Experiment:</i> Niederschlagsintensität | <i>Klasse:</i> geringe Intensität <i>Experiment:</i> Niederschlagsintensität |
| <i>Klasse:</i> leichtes Absinken <i>Experiment:</i> Vertikalbewegung | <i>Klasse:</i> starkes Aufsteigen <i>Experiment:</i> Vertikalbewegung |
| <i>Klasse:</i> mit städtische Wärmeinsel <i>Experiment:</i> städtische Wärmeinsel | <i>Klasse:</i> keine städtische Wärmeinsel <i>Experiment:</i> städtische Wärmeinsel |
| <i>Klasse:</i> Winter <i>Experiment:</i> Jahreszeit | <i>Klasse:</i> Sommer <i>Experiment:</i> Jahreszeit |
| <i>Klasse:</i> hohe Windgeschwindigkeiten <i>Experiment:</i> Windgeschwindigkeit | <i>Klasse:</i> geringe Windgeschwindigkeiten <i>Experiment:</i> Windgeschwindigkeit |
| <i>Klasse:</i> keine <i>Experiment:</i> Windrichtung | <i>Klasse:</i> alle 8 Richtungssektoren <i>Experiment:</i> Windrichtung |
| <i>Klasse:</i> keine <i>Experiment:</i> Luftmassen | <i>Klasse:</i> keine <i>Experiment:</i> Luftmassen |
| <i>Klasse:</i> keine <i>Experiment:</i> Großwettertypen | <i>Klasse:</i> keine <i>Experiment:</i> Großwettertypen |

Name: **Regen mit Frontpassage**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen in Berlin Tempelhof und Frontpassage über Berlin

Fallzahl: 3846 mittlere Gesamtsumme: 9353 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 32 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm

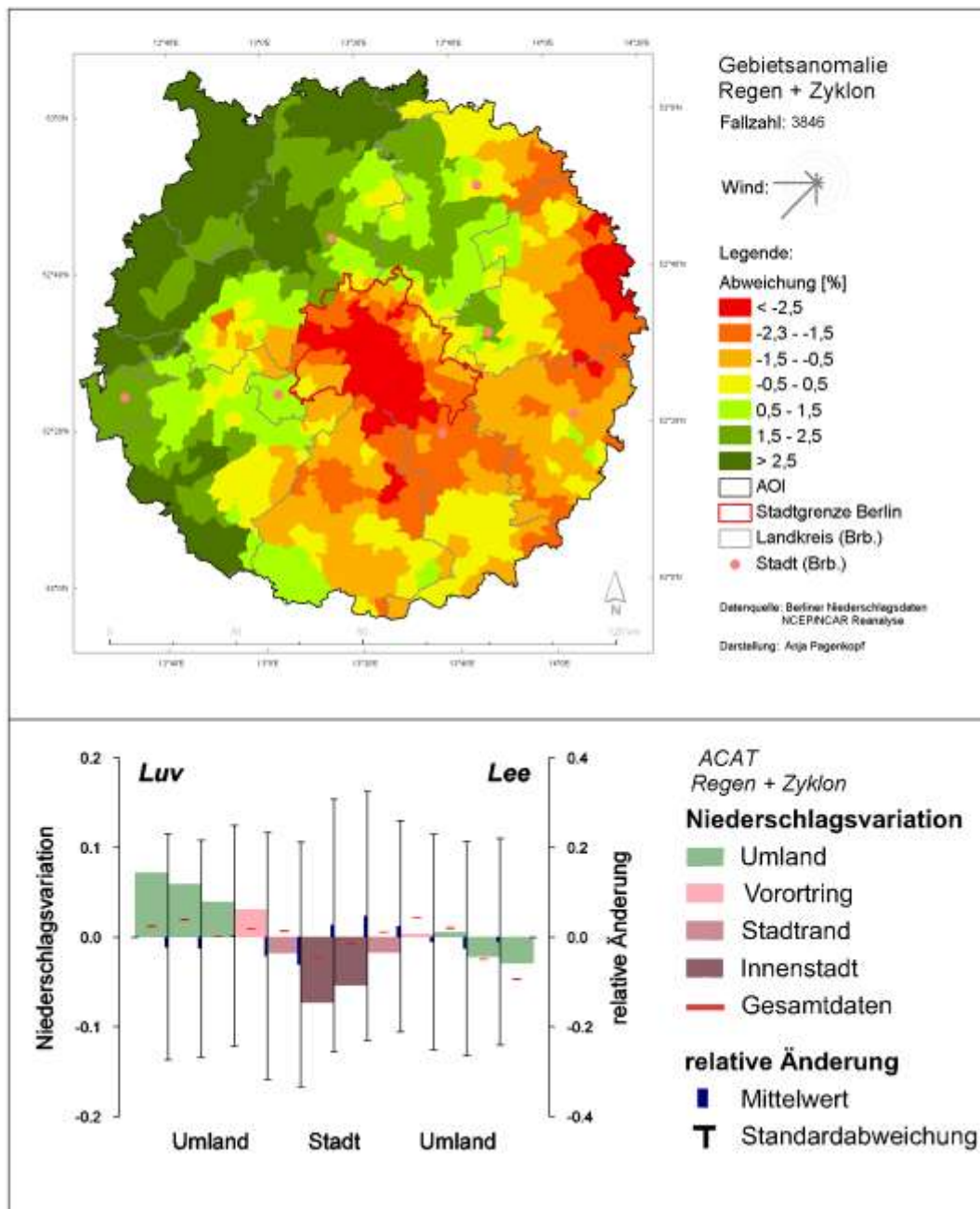


Abbildung 7-1: Übersichtsblatt der Experimentklasse Advektionsniederschläge bei Frontpassage

An ‚Tagen mit Frontpassagen‘ beziehungsweise an ‚Tagen mit Advektionsniederschlägen‘ ist ein synoptischer Gradient der von Nordwest nach Südost abnehmenden Niederschlagshöhen bestimmend. Innerhalb dieses Gradienten bildet sich über dem Stadtgebiet sehr häufig eine zusätzliche regionale Senke aus (siehe Abbildung 7-1). Dieses innerstädtische Niederschlagsminimum bestätigt sich für die Klasse der ‚Tage mit großräumig aufsteigender Vertikalbewegung‘.

Bei Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel in Berlin verschiebt sich an ‚Regentagen‘ die Lage des Hauptmaximums vom nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes in den Nordosten. Die Gegenüberstellung der ‚Frontalniederschlagsverteilungen‘ für Sommer und Winter zeigt eine vergleichbare Verlagerung des Schwerpunktes positiver Anomaliewerte von Nordwest nach Nordost. Daraus kann abgeleitet werden, dass es durch den urbanen Einfluss in einer Atmosphäre mit großräumig suboptimalen Bedingungen für lokale Niederschlagsbildung zu einer nachweisbaren urbanen Zunahme der Niederschlagshöhen kommen kann.

Während sich der Stadtkörper unter Bedingungen, die eine kleinräumige Niederschlagsentstehung begünstigen, im Mittel lokal verstärkend auswirkt, kommt es bei großräumig gesteuerter Niederschlagsentstehung über dem Stadtgebiet zu einer Verringerung der Tagessummen des fallenden Niederschlags. Die Experimente, angewendet auf den Berliner Niederschlagsdatensatz, weisen darauf hin, dass die urbane Verstärkung durch intensiviert Niederschlagsbildung über der Stadt bedingt wird, während die urbane Verminderung aus der Veränderung des Niederschlagsgeschehens innerhalb der Stadtatmosphäre resultiert.

Mit dem Begriff ‚Urban Induced Precipitation‘ (UIP) wird in der Regel die Verstärkung von Konvektionsniederschlag mit einem Maximum in Lee der Stadt beschrieben. Um die niederschlagsvermindernde Wirkung der Stadtatmosphäre auf Advektionsniederschläge, die in Berlin ein Innenstadtminimum hervorruft, in dasselbe Akronym einzubeziehen, wäre es vorstellbar, den zugrunde liegenden Begriff durch ‚Urban Influenced Precipitation‘ zu ersetzen.

8 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Übersicht über die Einflussfaktoren und die sich daraus ergebende urbane Modifikation der Niederschlagsbildung (eigene Zusammenstellung)..... | 3 |
| Abbildung 1-2: Schema des Experimentdesigns zur Untersuchung der urban geprägten Niederschlagsverteilung unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen | 7 |
| Abbildung 2-1: Jahresgang der Niederschlagshöhe berechnet aus den mittleren monatlichen Gebietsniederschlagshöhen des Untersuchungsgebietes, Berlin und Umgebung im Umkreis von 40 Kilometern, für den Zeitraum von 1951 bis 2000 (Klasseneinteilung siehe Kap. 3.2.1) | 11 |
| Abbildung 3-1: Schema über die Arbeitsschritte der Flächeninterpolation nach der Quadranten-Methode..... | 21 |
| Abbildung 3-2: Flusschema der programmierten Verarbeitungsschritte | 26 |
| Abbildung 3-3: Häufigkeitsverteilung der höchsten täglichen Teilgebietssumme im Untersuchungsgebiet (Berlin und umgebende Gebiete Brandenburgs) für den Zeitraum 1951-2000 .. | 28 |
| Abbildung 3-4: Häufigkeitsverteilung der mittleren Omega Werte, im Gebiet zwischen 10°-15° ö.L. und 50°-55° n.B für Niederschlagstage von 1951 bis 2000 aus den NCAR-NCEP Daten | 32 |
| Abbildung 4-1: Mittelung der Übersichtsblätter einer Implemented Data Collection (IDC) aus Tagesdaten am Beispiel: Schauertage (W=8 und 9 an der Station Berlin-Tempelhof) | 39 |
| Abbildung 4-2: Übersichtsblatt der IDC über alle Niederschlagstage | 40 |
| Abbildung 4-3: Übersichtsblatt der IDC Konvektionsniederschlagstage..... | 42 |
| Abbildung 4-4: Übersichtsblatt der IDC Advektionsniederschlagstage..... | 43 |
| Abbildung 4-5: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie für alle Teilgebiete an Regen- und Schauertagen..... | 44 |
| Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der Teilmengen von Regentagen (y-Achse) zu allen Regentagen (x-Achse) in Form mittlerer relativer Gebietsanomaliewerte der Teilgebiete..... | 45 |
| Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der Teilmengen von Schauertagen (y-Achse) zu allen Schauertagen (x-Achse) in Form mittlerer relativer Gebietsanomaliewerte der Teilgebiete..... | 46 |
| Abbildung 4-8: Verteilung der mittleren Lufttemperatur über dem Osten Deutschlands aus den Daten des Gebietsausschnittes zwischen 10° und 15° ö.L. sowie 50° und 55° n.B. [$\Delta T = 1$ Kelvin, $T_{min} = 7,9$ °C im Nordosten (lila), $T_{max} = 9,7$ °C im Südwesten (pink)](zur Verfügung gestellt von NOAA-ESRL Physical Sciences Division auf der Webseite http://www.esrl.noaa.gov/psd/) | 49 |
| Abbildung 4-9: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie der Teilgebiete für die IDC aus der Dreifachfaktorkombination Niederschlagstyp-Jahreszeit-Wärmeinsel bezogen auf die mittlere | |

| | |
|---|----|
| relative Gebietsanomalie der IDC der jeweiligen Jahreszeit in der linken Spalte, und in der rechten Spalte bezogen auf die Ausprägung der Wärmeinsel (UHI) | 52 |
| Abbildung 4-10: Übersichtsblatt der IDC Starkniederschlagstage..... | 54 |
| Abbildung 4-11: Anteilige Aufteilung der Schauer- und Regentage nach Intensitätsstufen | 55 |
| Abbildung 4-12: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie für die Teilgebiete an Niederschlagstagen mit und ohne Frontpassage..... | 59 |
| Abbildung 4-13: Übersichtsblatt der IDC mit Frontpassage | 60 |
| Abbildung 4-14: Übersichtsblatt der IDC ohne Frontpassage..... | 61 |
| Abbildung 4-15: Gegenüberstellung der mittleren relativen Gebietsanomalie der Teilgebiete für die IDC aus der Faktorkombination Niederschlagstyp-Frontpassage bezogen auf die mittleren relativen Gebietsanomalie der IDC des jeweiligen Fronttyps in der linken Spalte, und in der rechten Spalte bezogen auf die Ausprägung der Niederschlagstypen..... | 64 |
| Abbildung 4-16: Stärke-Windrose der relativen Häufigkeit der mittleren täglichen Windrichtung aus den NCEP/NCAR Reanalysedaten für Niederschlagstage im Zeitraum 1951-2000..... | 66 |
| Abbildung 4-17: Lage der dominanten Zonen positiver Niederschlagsanomalie für die Windrichtungssektoren..... | 67 |
| Abbildung 4-18: Streudiagramm und Korrelationsmatrix der windrichtungsbezogen IDC untereinander | 68 |
| Abbildung 4-19: Aufteilung der Niederschlagstage mit und ohne Frontpassage nach Windrichtungen | 71 |
| Abbildung 5-1: Niederschlagsverteilung in Abhängigkeit von der Windrichtung (Kalb, 1962: S. 98) | 76 |
| Abbildung 5-2: Niederschlag in Prozent des Gebietsmittels (Graf, 1979: S. 173f, 177f)..... | 77 |
| Abbildung 5-3: Gesamter Sommerniederschlag (cm), 1971-1975 in St. Louis (USA) (METROMEX, 1977: S. 14) | 79 |
| Abbildung 5-4: Übersichtsblatt der IDC Tage mit Wind aus dem Südwestsektor | 87 |
| Abbildung 5-5: Übersichtsblatt der IDC Tage mit Wind aus dem Nordwestsektor | 88 |
| Abbildung 7-1: Übersichtsblatt der Experimentklasse Advektionsniederschläge bei Frontpassage | 97 |

9 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 2-1: Vergleich der gemessenen mittleren Jahressummen an drei meteorologischen Hauptstationen des DWD und des die Station einschließenden Gebietsniederschlags (1951-2000).... | 13 |
| Tabelle 2-2: Anzahl der Stationen klassifiziert nach der Datenverfügbarkeit bezogen auf alle Niederschlagstage im Untersuchungszeitraum 1951-2000 | 14 |
| Tabelle 2-3: Übersicht über Stützstationen für räumliche Strukturen der interpolierten Niederschlagsverteilung nach den Himmelsrichtungen | 14 |
| Tabelle 3-1: Zusammenschau der Eigenschaften des Berliner Niederschlagsdatensatzes | 19 |
| Tabelle 3-2: Übersicht der Niederschlagsintensitätsklassen abgeleitet aus den höchsten täglichen Teilgebietssummen im Untersuchungsgebiet (Berlin und umgebende Gebiete Brandenburgs) für den Zeitraum 1951-2000 | 28 |
| Tabelle 3-3: Zuordnung des Wolkenschlüssels in Klassen von Niederschlagswolken..... | 30 |
| Tabelle 3-4: Übersicht der Klassen mittlerer Omega-Werte, im Gebiet zwischen 10°-15° ö.L. und 50°-55° n.B, für Niederschlagstage von 1951 bis 2000 aus den NCAR-NCEP Daten | 31 |
| Tabelle 3-5: Zuordnung der Angaben zur Frontpassage in der Berliner Wetterkarte zu Klassen ähnlichen Fronttyps | 33 |
| Tabelle 3-6: Zuordnung der Luftmassenangaben in der Berliner Wetterkarte zu Klassen ähnlichen Luftmassentyps..... | 33 |
| Tabelle 3-7: Zuordnung der Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky zu Klassen nach der Strömungsrichtung und zu Klassen nach der Zyklonalität (Abkürzungen der Großwetterlagen siehe (Gerstengarbe und Werner, 2006)) | 35 |
| Tabelle 3-8: Zusammenfassung der Landnutzungsklassen aus CORINE2000 Landnutzungs- und Landbedeckungstypen zu aggregierten Landnutzungstypen..... | 36 |
| Tabelle 4-1: Übersichtstabelle über getestete Bedingungen zur Ausbildung einer urbanen Niederschlagsverstärkung (+) oder eines innerstädtischen Minimums (-) | 74 |
| Tabelle 7-1: Übersicht der Experimente mit einer Zuordnung zu den zwei festgestellten Typen der urbanen Niederschlagsmodifikation..... | 96 |

10 Kartenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Karte 2-1: Prozentualer Anteil versiegelter Flächen, CLC Klassen 11, 121, 122 und 123) an den Teilgebieten im Untersuchungsgebiet (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) im Jahr 2000 (eigene Darstellung basierend auf den Daten von CORINE2000)..... | 10 |
| Karte 2-2: Relief und Landschaftsgliederung im Untersuchungsgebiet (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) (eigene Darstellung basierend auf den Daten des DEM90m der SRTM)..... | 10 |
| Karte 2-3: Einteilung des Untersuchungsgebietes (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) in kleinste administrative Teilgebiete für die Niederschlagsinterpolation..... | 15 |
| Karte 2-4: Verteilung der Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet (Berlin und angrenzende Gebiete Brandenburgs) und im Interpolationsgebiet (kleine Karte) | 15 |
| Karte 2-5: Räumliche Verteilung der mittleren Jahressumme in Berlin und den angrenzenden Gebieten Brandenburgs für den Zeitraum 1951-2000 | 16 |
| Karte 2-6: Angenäherte langjährige mittlere Niederschlagsverteilung in Berlin nach den Reihen 1891-1930, 1901-1950 und 1960-69 (Quelle: Schlaak, 1972) | 16 |
| Karte 3-1: Fallbeispiel für die Niederschlagsinterpolation eines Tages und die Darstellung des ACAT zum Vergleich mit den Niederschlagshöhen an den einfließenden Messstationen | 23 |
| Karte 4-1: Tageskarte der Niederschlagshöhe vom 08. August 1978, der Tag mit den höchsten gemessenen Werten innerhalb des Untersuchungszeitraums (1951-2000) als Fallbeispiel einer Niederschlagsverteilung für einen Tag mit einem Tiefdrucksystem auf der Vb Zyklonenzugbahn nach van Bebber..... | 70 |
| Karte 7-1: Beispiel für ein Analyseobjekt - Karte der relativen Gebietsanomalie vom 22.05.1993 mit einem Gesamtgebietsmittelwert von 9,1 mm | 94 |

Literaturverzeichnis

- Baik, J.-J.; Kim, Y. H. und Chin, H. Y. (2001): Dry and moist convection forced by an urban heat island, *Journal of Applied Meteorology* (Band 40), Seite 1462-1475.
- Barry, R. G. (1992): *Mountain Weather and Climate*, London.
- Belger, W. (1940): *Großstadteinfluß auf nichtstationäres Regenfronten und ein Beitrag zur Bildung lokaler Wärmegewitter*, Berlin.
- Bendix, J. (2004): *Geländeklimatologie*, Berlin.
- Berliner Wetterkarte e.V. und Deutscher Wetterdienst (1952-2000): Berliner Wetterkarte, Berlin**
- Bigg, E. K. (2008): Trends in rainfall associated with sources of air pollution, *Environmental Chemistry* (Band 5), Nr. 3, Seite 184-193.
- Böhm, R. (1979): Untersuchungen des urbanen Einflusses auf das Niederschlagsfeld in der Umgebung einer Großstadt mit Hilfe verschiedener statistischer Methoden, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B* (Band 27), Seite 225-246.
- Bornstein, R. D. und LeRoy, M. (1990): Urban barrier effect on convective and frontal thunderstorms, 4th Conference on Mesoscale Processes, Boulder.
- Bruckmann, P. und Eikmann, T. (2007): Feinstäube und menschliche Gesundheit, *Chemie in unserer Zeit* (Band 41), Seite 248-453.
- Büdel, J. (1981): *Klima-Geomorphologie*, Berlin.
- Changnon Jr., S. A. (1968): The La Porte weather anomaly- fact or fiction, *Bulletin of the American Meteorological Society* (Band 49), Nr. 1, Seite 4-11.
- Changnon Jr., S. A.; Shealy, R. T. und Scott, R. W. (1991): Precipitation Changes in Fall, Winter, and Spring Caused by St. Louis, *Journal of Applied Meteorology* (Band 30), Nr. 1, Seite 126-134.
- Deutscher Wetterdienst (2006): SYNOP Meldungen der Station Berlin-Tempelhof 1951-2000**
- DLR-DFD (2004): CORINE Land Cover (CLC2000), Umweltbundesamt.**
- Fraedrich, K.; Bach, R. und Naujokat, G. (1986): Single Station Climatology of Central European Fronts: Number, Time and Precipitation Statistics, *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* (Band 59), Nr. 1, Seite 54-65.
- Gabriel, K. (2009): *Gesundheitsrisiken in Ballungsräumen unter sich wandelnden Klimabedingungen*, Geographisches Institut, Humboldt-Universität, Berlin.
- Gerstengarbe, F.-W. und Werner, P. C. (2006): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, PIK Reports, Potsdam, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, 100, http://www.pik-potsdam.de/pik_web/publications/pik_reports/reports/pr.100/pr100.pdf**
- Graf, H.-F. (1979): Der Einfluss von Großstädten auf das Niederschlagsregime am Beispiel von Berlin, *Meteorologisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin*, Berlin.
- Graf, H.-F. und Gräfe, I. (1979): Die Niederschlagsverteilung im Raum Berlin in Abhängigkeit von der Höhenwetterlage und der Bodenwindrichtung, *Zeitschrift für Meteorologie* (Band 29), Seite 56-64.
- Guo, X. L.; Fu, D. H. und Wang, J. (2006): Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City, *Atmospheric Research* (Band 82), Nr. 1-2, Seite 112-126.
- Heever, S. c. van den und Cotton, W. R. (2006): Urban Aerosol Effects On Convective Storm Characteristics, *Six Symposium on the Urban Environment*.
- Helbig, A. (1991): Anthropogene Modifikation des Lokalklimas im Stadtgebiet und in Industrie-Ballungsräumen, Hupfer, P., *Das Klimasystem der Erde* Seite 256-266, Berlin.
- Hendl, M. (1969): Grundzüge des Klimas im Havel-Spree-Raum zwischen Nördlichem und südlichem Landrücken, *Wissenschaftliche Abhandlungen der Geographischen Gesellschaft der DDR*, Nr. 10, Seite 37-66.

- Hendl, M. (1995): Klima, Liedke, H. und Marcinek, J., Physische Geographie Deutschlands, Gotha.
- Howard, L. (1833): The climate of London deduced from meteorological observations made in the metropolis, London.
- Hupfer, P. und Kuttler, W. (1998): Witterung und Klima, Stuttgart.
- Kalb, M. (1962): Einige Beiträge zum Stadtklima von Köln, Meteorologische Rundschau (Band 15), Nr. 4, Seite 92-99.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Jenne, Roy und Joseph, Dennis (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, Bulletin of the American Meteorological Society (Band 77), Nr. 3, Seite 437-471.
- Kampa, Marilena und Castanas, Elias (2008): Human health effects of air pollution, Environmental Pollution (Band 151), Nr. 2, Seite 362.
- Kaufmann, Robert K.; Seto, Karen C.; Schneider, Annemarie; Liu, Zouting; Zhou, Liming und Wang, Weile (2007): Climate Response to Rapid Urban Growth: Evidence of a Human-Induced Precipitation Deficit, Journal of Climate (Band 20), Nr. 10, Seite 2299-2306.
- Kohl, E. (1969): Das Klima der Stadt Berlin, Wissenschaftliche Abhandlungen der Geographischen Gesellschaft der DDR, Nr. 10, Seite 67-84.
- Kuttler, W. (1993): Stadtklima, Sukopp, H. und Witting, R., Stadtökologie, Stuttgart.
- Kuttler, W.; Weber, S.; Schonnefeld, J. und Hesselschwerdt, A. (2007): Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany, International Journal of Climatology (Band 27), Nr. 14, Seite 2005.
- Loose, T. und Bornstein, R. D. (1977): Observations of mesoscale effects on frontal movement through an urban area, Monthly Weather Review (Band 105), Nr. 5, Seite 563-571.
- Lowry, W. P. (1977): Empirical Estimation Of Urban Effects On Climate - Problem Analysis, Journal Of Applied Meteorology (Band 16), Nr. 2, Seite 129-135.
- Lowry, W. P. (1998): Urban effects on precipitation amount, Progress in Physical Geography (Band 22), Nr. 4, Seite 477-520.
- Malberg, H. und Frattesi, G. (1990): Über die Ursachen der Niederschlagsstrukturen im Stadtgebiet von Berlin, Zeitschrift für Meteorologie (Band 40), Nr. 6, Seite 387-394.
- Malitz, G. und Rudolf, B. (2009): Niederschläge im urbanen Raum, Klimastatusbericht, Nr. 2008, Seite 33-38.
- METROMEX (1977): Summary of METROMEX, Volume1: Weather Anomalies and Impacts, Bulletin of the American Meteorological Society (Band 62).
- Molders, N. und Olson, M. A. (2004): Impact of Urban Effects on Precipitation in High Latitudes, Journal of Hydrometeorology (Band 5), Nr. 3, Seite 409-429.
- Moriwaki, Ryo; Kanda, Manabu; Senoo, Hiroshi; Hagishima, Aya und Kinouchi, Tsuyoshi (2008): Anthropogenic water vapor emissions in Tokyo, Water Resour. Res. (Band 44), Nr. 11, Seite W11424.
- Oke, T. R. (1990): Boundary layer climates, London.
- Pfützner, B.; Lahmer, W. und Becker, A. (1997): ARC/EGMO - Programmsystem zur GIS-gestützten hydrologischen Modellierung, überarbeitete Kurzdokumentation zur Version 2.0, unveröffentlicht, Berlin.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A. und Bamler, R. (2003): The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, Photogramm. Rem. Sens. (Band 57), Seite 241-262.
- Reidat, R. (1971): Über den Einfluss der Stadt auf die Niederschlagsverteilung bei starken Regenfällen in Hamburg, Wetter und Leben (Band 23), Seite 1-6.
- Rosenfeld, D. (2000): Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution, Science (Band 287), Nr. 5459, Seite 1793-1796.

- Schlaak, P. (1972): Mittlere und extreme Niederschlagsverhältnisse in Berlin, Beilage zur Berliner Wetterkarte, Nr. 8.
- Schlaak, P. (1977): Die Auswirkungen der bewaldeten und bebauten Gebiete der Stadtlandschaft von Berlin auf den Niederschlagshaushalt, *Annalen der Meteorologie* (Band 12), Seite 190-192.
- Schlünzen, K. H.; Hoffmann, P.; Rosenhagen, G. und Riecke, W. (2009): Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg, *International Journal of Climatology* (Band 30), Nr. 8, Seite 1121-1136.
- Schönwiese, C.-D. und Birrong, W. (1990): European precipitation trend statistics 1851-1980 including multivariate assessments of the anthropogenic CO₂ signal, *Zeitschrift für Meteorologie* (Band 40), Nr. 2, Seite 92-98.
- Schütz, M. (1995): Anthropogene Niederschlagsmodifikationen im komplex-urbanen Raum am Beispiel des Ruhrgebiets, Essen.
- Schütz, M. (1996): Anthropogene Starkregenmodifikation im komplex-urbanen Raum, *Geowissenschaften* (Band 14), Nr. 6, Seite 249-252.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2009): Straßenbäume in Berlin**
- Tabelle: Anzahl Bäume je km Stadtstraße (Bestandsdichte) in Berlin und den Bezirken,**
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/stadtgruen/stadtbaeume/de/daten_fakten/uebersichten/index.shtml. Berlin
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (2010): Langfristige Entwicklung der Luftqualität - Schwebstaub / Feinstaub PM₁₀, 17.08.2010**
- Shafir, H. und Alpert, P. (1990): On The Urban Orographic Rainfall Anomaly In Jerusalem - A Numerical Study, *Atmospheric Environment Part B-Urban Atmosphere* (Band 24), Nr. 3, Seite 365-375.
- Shem, Willis und Shepherd, Marshall (2009): On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies, *Atmospheric Research* (Band 92), Nr. 2, Seite 172.
- Shepherd, J. M. (2005): A Review of Current Investigations of Urban-Induced Rainfall and Recommendations for the Future, *Earth Interactions* (Band 9), Nr. 12, Seite 1-27.
- Shepherd, J. M.; Pierce, H. und Negri, A. J. (2002): Rainfall Modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite, *Journal of Applied Meteorology* (Band 41), Nr. 7, Seite 689-701.
- Stulov, E. A. (1993): Urban effects on summer precipitation in Moscow, *Russian Meteorology and Hydrology* (Band 11), Seite 34-41.
- Thielen, J.; Wobrock, W.; Dadian, A.; Mestayer, P.G. und Creutin, J.-D. (2000): The possible influence of urban surface on rainfall development: a sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale, *Atmospheric Research* (Band 54), Nr. 1, Seite 15-39.
- Vogel, J. L. und Huff, F. A. (1978): Relation Between St-Louis Urban Precipitation Anomaly And Synoptic Weather Factors, *Journal Of Applied Meteorology* (Band 17), Nr. 8, Seite 1141-1152.
- Vogt, Hasso (2000): Erklärungen zur Berliner Wetterkarte, *Berliner Wetterkarte*, Seite 1-31.
- Wang, X. Q.; Wang, Z. F.; Qi, Y. B. und Guo, H. (2009): Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area, *Science In China Series D-Earth Sciences* (Band 52), Nr. 2, Seite 250-256.
- Weischet, W. und Endlicher, W. (2008): Einführung in die Allgemeine Klimatologie, Stuttgart.
- World Meteorologic Organisation (2010): Manual on Codes (WMO-No. 306), WMO Technical Regulations. Auflage, Genf.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die eingereichte Dissertation „Urbane Niederschlagsbeeinflussung – Genese und räumliche Differenzierung am Beispiel von Berlin“ selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht.

Ich habe mich weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form bereits um einen Doktorgrad beworben, noch besitze ich einen Doktorgrad in dem Promotionsfach. Die eingereichte Dissertation hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht.

Die Promotionsordnung Nr. 22/2005 der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II der Humboldt-Universität zu Berlin, die dem Verfahren zugrunde liegt, ist mir bekannt.

Berlin, den 15. November 2010

Anja Pagenkopf

Anhang

Inhaltsübersicht

Einfaktorielles Experiment: Niederschlagstyp

- Konvektionsniederschläge (Schauertage) Anhang 1-1
- Konvektionsbewölkung Anhang 1-2
- Advektionsniederschläge (Regentage) Anhang 1-3
- Advektionsbewölkung Anhang 1-4

Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit

- Sommerschauer Anhang 3-1
- Winterschauer Anhang 3-2
- Sommerregen Anhang 3-3
- Winterregen Anhang 3-4

Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, städtische Wärmeinsel

- Schauer mit Wärmeinsel Anhang 4-1
- Schauer ohne Wärmeinsel Anhang 4-2
- Regen mit Wärmeinsel Anhang 4-3
- Regen ohne Wärmeinsel Anhang 4-4

Dreifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit, städtische Wärmeinsel

- Sommerschauer mit Wärmeinsel Anhang 5-1
- Winterschauer mit Wärmeinsel Anhang 5-2
- Sommerschauer ohne Wärmeinsel Anhang 5-3
- Winterschauer ohne Wärmeinsel Anhang 5-4
- Sommerregen mit Wärmeinsel Anhang 5-5
- Winterregen mit Wärmeinsel Anhang 5-6
- Sommerregen ohne Wärmeinsel Anhang 5-7
- Winterregen ohne Wärmeinsel Anhang 5-8

Einfaktorielles Experiment: Niederschlagsintensität

- alle Niederschlagstage Anhang 6-1
- Schwachniederschlagstage Anhang 6-2
- Durchschnittsniederschlagstage Anhang 6-3
- Intensivniederschlagstage Anhang 6-4
- Starkniederschlagstage Anhang 6-5
- Extremniederschlagstage Anhang 6-6

Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

- schwache Schauer Anhang 7-1
- durchschnittliche Schauer Anhang 7-2
- intensive Schauer Anhang 7-3
- starke Schauer Anhang 7-4
- schwacher Regen Anhang 7-5
- durchschnittlicher Regen..... Anhang 7-6
- intensiver Regen Anhang 7-7
- starker Regen Anhang 7-8

Zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

- Schauer bei geringer Windgeschwindigkeit Anhang 8-1
- Schauer bei mittlerer Windgeschwindigkeit Anhang 8-2
- Schauer bei hoher Windgeschwindigkeiten Anhang 8-3
- Regen bei geringer Windgeschwindigkeit Anhang 8-4
- Regen bei mittlerer Windgeschwindigkeit Anhang 8-5
- Regen bei hoher Windgeschwindigkeit Anhang 8-6

Einfaktorielles Experiment: Frontpassage

- mit Frontpassage Anhang 9-1
- Warmfrontpassage Anhang 9-2
- Kaltfrontpassage Anhang 9-3
- Okklusionspassage Anhang 9-4
- Luftmassenübergang Anhang 9-5
- keine Frontpassage Anhang 9-6
- ohne Frontpassage Anhang 9-7

Zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Jahreszeit

- mit Frontpassage im Winter Anhang 10-1
- mit Frontpassage im Sommer Anhang 10-2
- ohne Frontpassage im Winter Anhang 10-3
- ohne Frontpassage im Sommer Anhang 10-4

Zweifaktorielles Experiment Niederschlagstyp, Frontpassage

- Schauer bei Frontpassage Anhang 11-1
- Schauer bei Kaltfrontpassage Anhang 11-2
- Schauer ohne Frontpassage Anhang 11-3
- Regen bei Frontpassage Anhang 11-4
- Regen bei Warmfrontpassage Anhang 11-5
- Regen ohne Frontpassage Anhang 11-6

Einfaktorielles Experiment: Vertikalbewegung

- sehr stark Hebung Anhang 12-1
- starke Hebung Anhang 12-2
- mäßige Hebung Anhang 12-3
- schwache Hebung Anhang 12-4
- schwaches Absinken Anhang 12-5
- mäßiges Absinken Anhang 12-6

Zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

- mit Frontpassage bei geringer Windgeschwindigkeit Anhang 13-1
- mit Frontpassage bei mittlerer Windgeschwindigkeit Anhang 13-2
- mit Frontpassage bei hoher Windgeschwindigkeiten Anhang 13-3
- ohne Frontpassage bei geringer Windgeschwindigkeit Anhang 13-4
- ohne Frontpassage bei mittlerer Windgeschwindigkeit Anhang 13-5
- ohne Frontpassage bei hoher Windgeschwindigkeit Anhang 13-6

Einfaktorielles Experiment: Windrichtung

- Südwestsektor Anhang 14-1
- Westsektor Anhang 14-2
- Nordwestsektor Anhang 14-3
- Nordsektor Anhang 14-4
- Nordostsektor Anhang 14-5
- Ostsektor Anhang 14-6
- Südostsektor Anhang 14-7
- Südsektor Anhang 14-8

Zweifaktorielles Experiment: Frontdurchgang, Windrichtung

- mit Frontpassage bei Wind aus dem Südwestsektor Anhang 15-1
- mit Frontpassage bei Wind aus dem Westsektor Anhang 15-2
- mit Frontpassage bei Wind aus dem Nordwestsektor Anhang 15-3
- mit Frontpassage bei Wind aus dem Nordsektor Anhang 15-4
- mit Frontpassage bei Wind aus dem Nordostsektor Anhang 15-5
- mit Frontpassage bei Wind aus dem Ostsektor Anhang 15-6
- mit Frontpassage bei Wind aus dem Südostsektor Anhang 15-7
- mit Frontpassage bei Wind aus dem Südsektor Anhang 15-8
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Südwestsektor Anhang 15-9
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Westsektor Anhang 15-10
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Nordwestsektor Anhang 15-11
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Nordsektor Anhang 15-12
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Nordostsektor Anhang 15-13
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Ostsektor Anhang 15-14
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Südostsektor Anhang 15-15
- ohne Frontpassage bei Wind aus dem Südsektor Anhang 15-16

Einfaktorielles Experiment: Luftmassen

- maritime Luftmassen aus dem Norden Anhang 16-1
- kontinentale Luftmassen aus dem Norden Anhang 16-2
- maritime Luftmassen Anhang 16-3
- kontinentale Luftmassen Anhang 16-4
- maritime Luftmassen aus dem Süden Anhang 16-5
- kontinentale Luftmassen aus dem Süden Anhang 16-6

Einfaktorielles Experiment: Großwettertyp

- antizyklonale West- und Südwestlagen Anhang 17-1
- zyklonale West- und Südwestlagen Anhang 17-2
- antizyklonale Nord- und Nordwestlagen Anhang 17-3
- zyklonale Nord- und Nordwestlagen Anhang 17-4
- antizyklonale Ost- und Nordostlagen Anhang 17-5
- zyklonale Ost- und Nordostlagen Anhang 17-6
- antizyklonale Süd- und Südostlagen Anhang 17-7
- zyklonale Süd- und Südostlagen Anhang 17-8

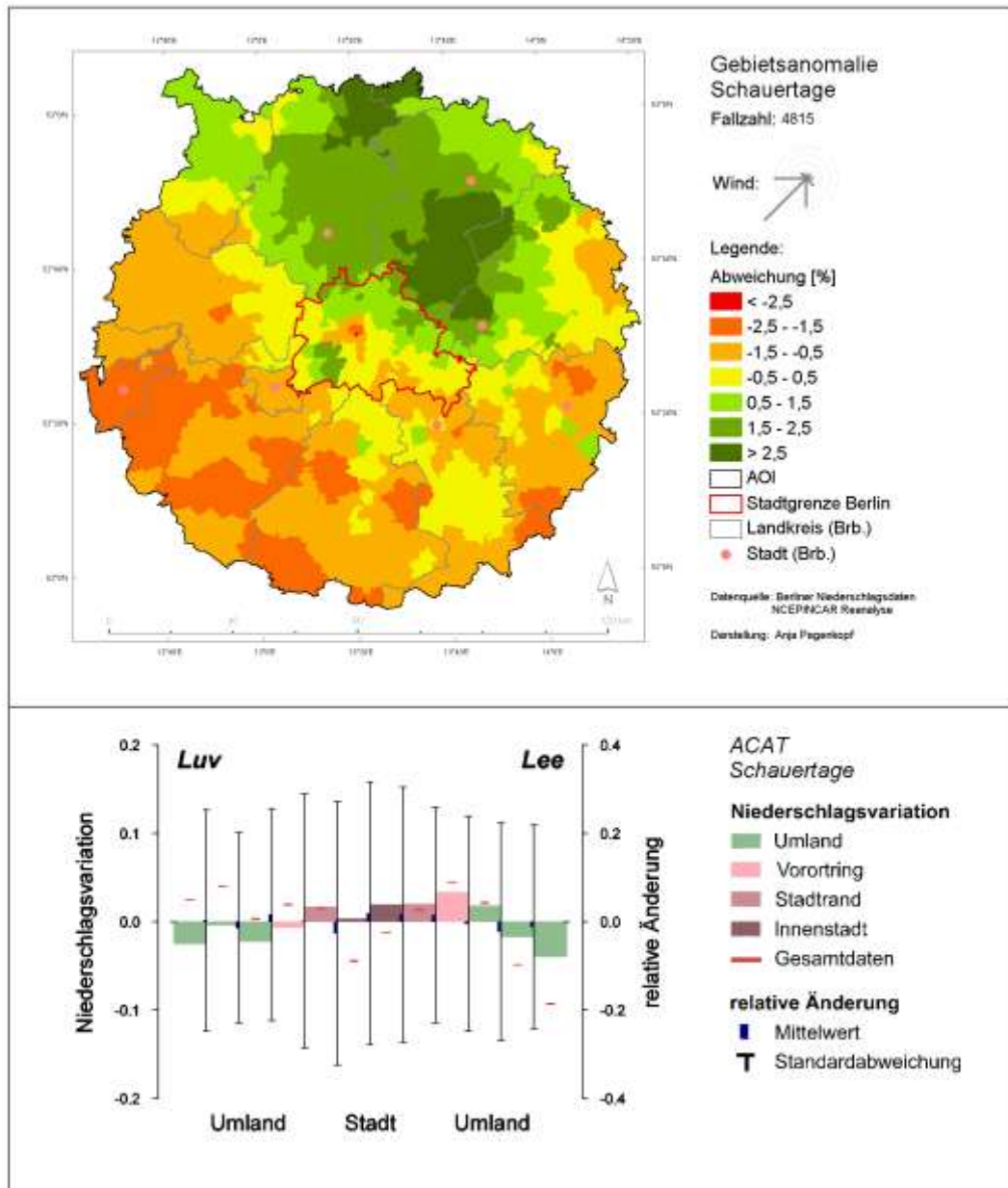
einfaktorielles Experiment: Niederschlagstyp

Name: **Konvektionsniederschläge (Schauertage)**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern an der Station Berlin-Tempelhof

Fallzahl: 4815 mittlere Gesamtsumme: 13375 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 41 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,8 mm



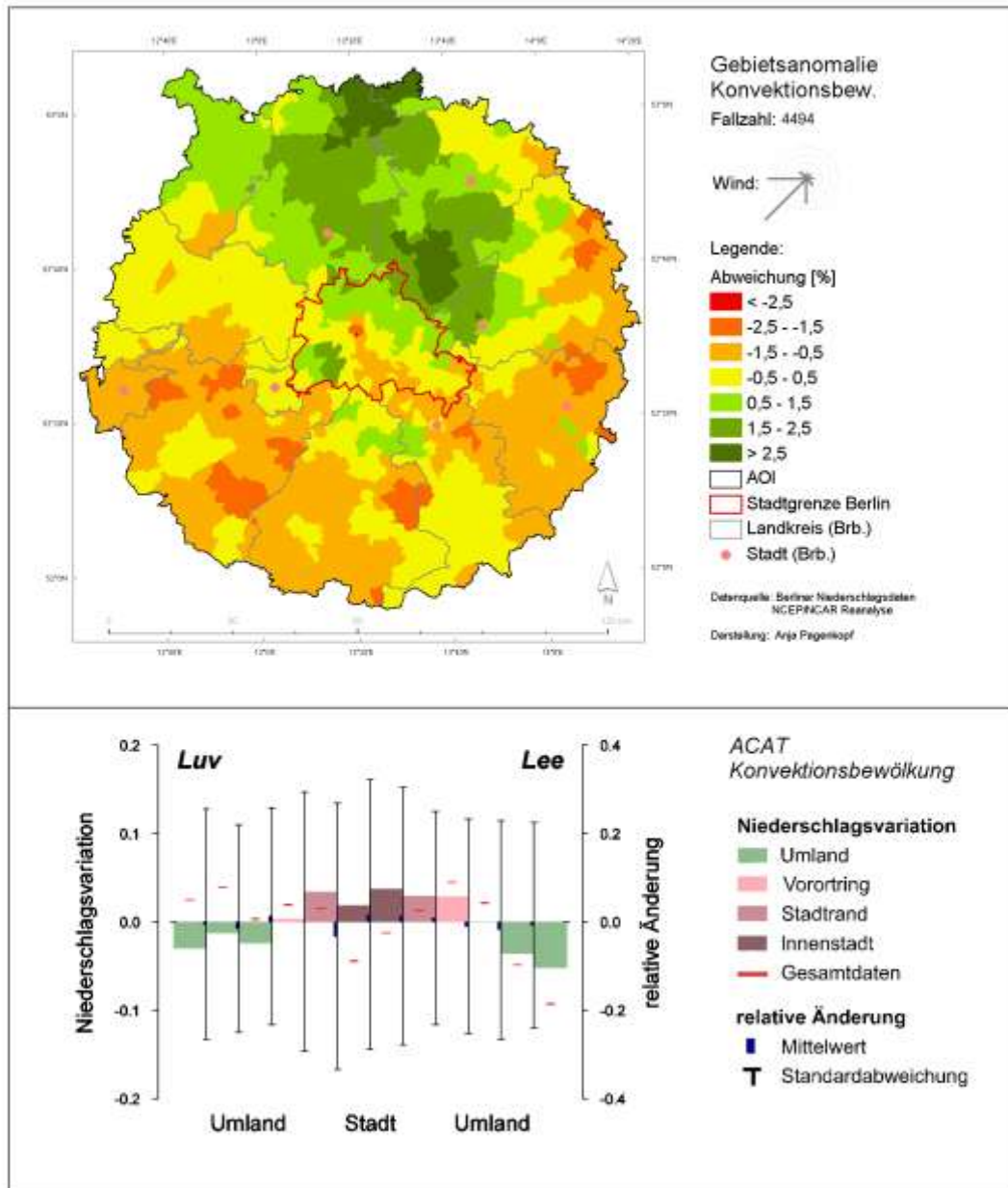
einfaktorielles Experiment Niederschlagstyp

Name: **Konvektionsbewölkung**

Beschreibung: Tage an denen dominierend Konvektionsbewölkung an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurde

Fallzahl: 4494 mittlere Gesamtsumme: 11266 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 38 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,5 mm



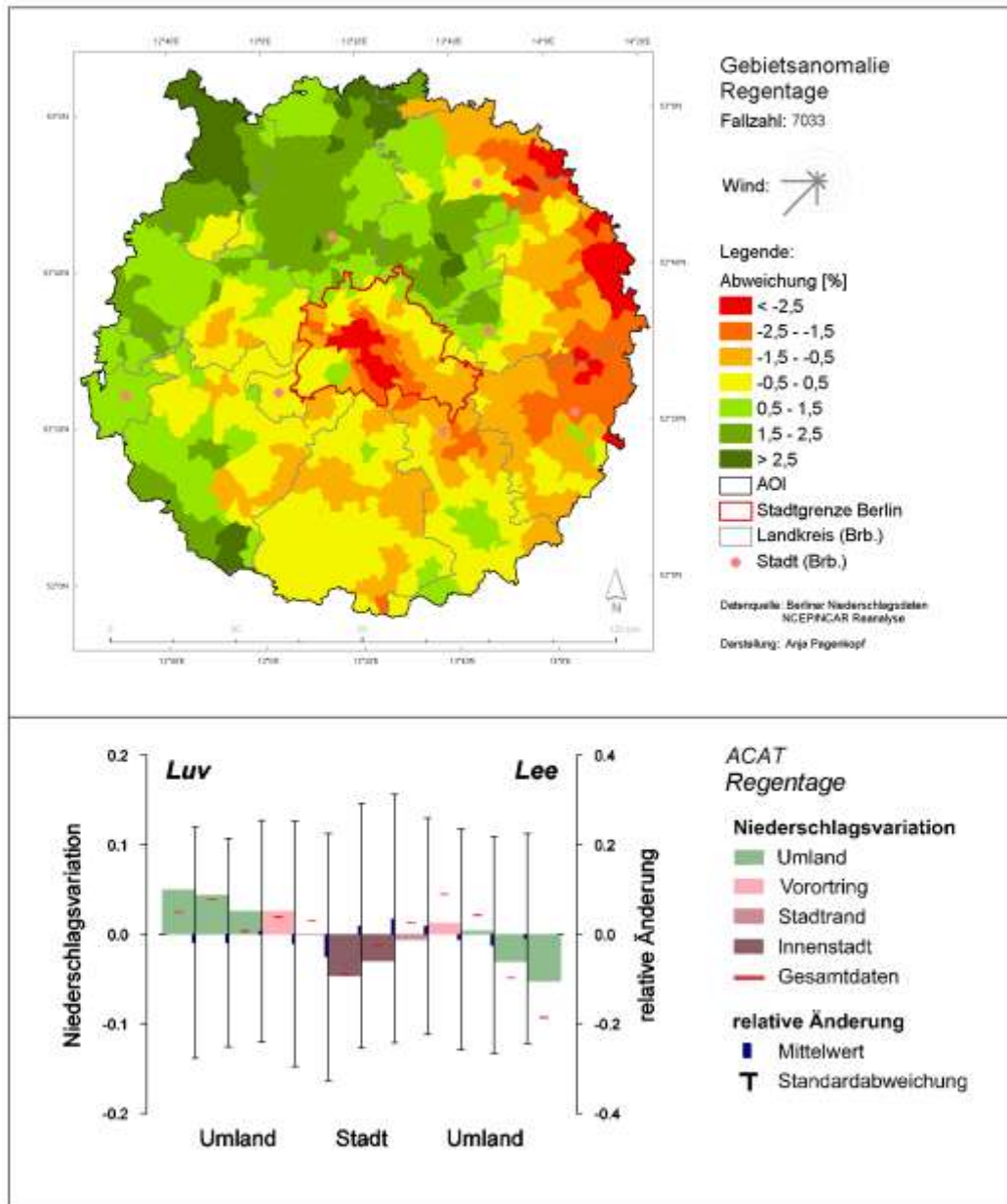
einfaktorielles Experiment: Niederschlagstyp

Name: Advektionsniederschläge (Regentage)

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen, Sprühregen oder Schnee an der Station Berlin-Tempelhof

Fallzahl: 7033 **mittlere Gesamtsumme:** 14280 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 59 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,0 mm



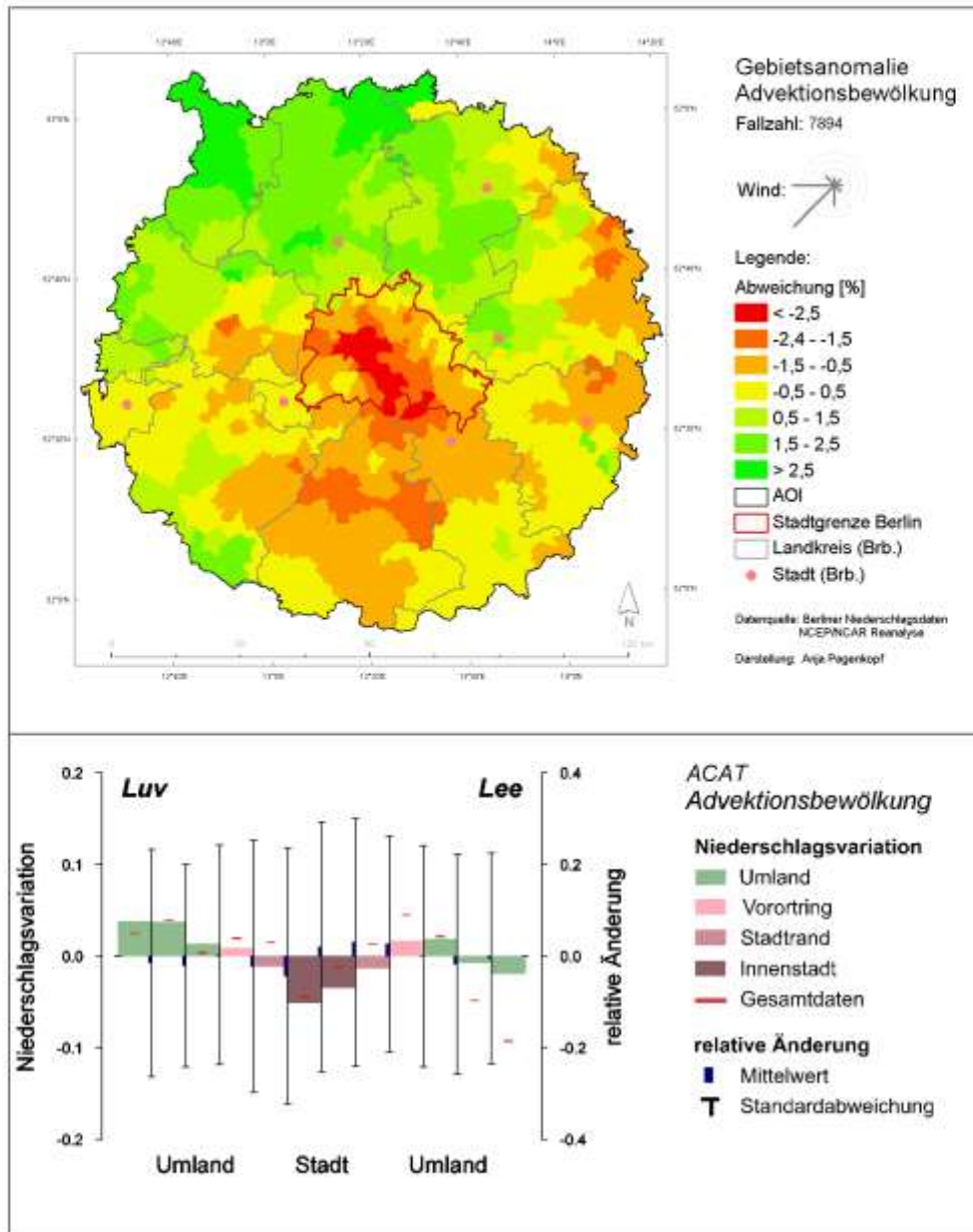
einfaktorielles Experiment: Niederschlagstyp

Name: **Advektionsbewölkung**

Beschreibung: Tage an denen dominierend Advektionsbewölkung an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurde

Fallzahl: 7894 mittlere Gesamtsumme: 22199 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 67 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,8 mm



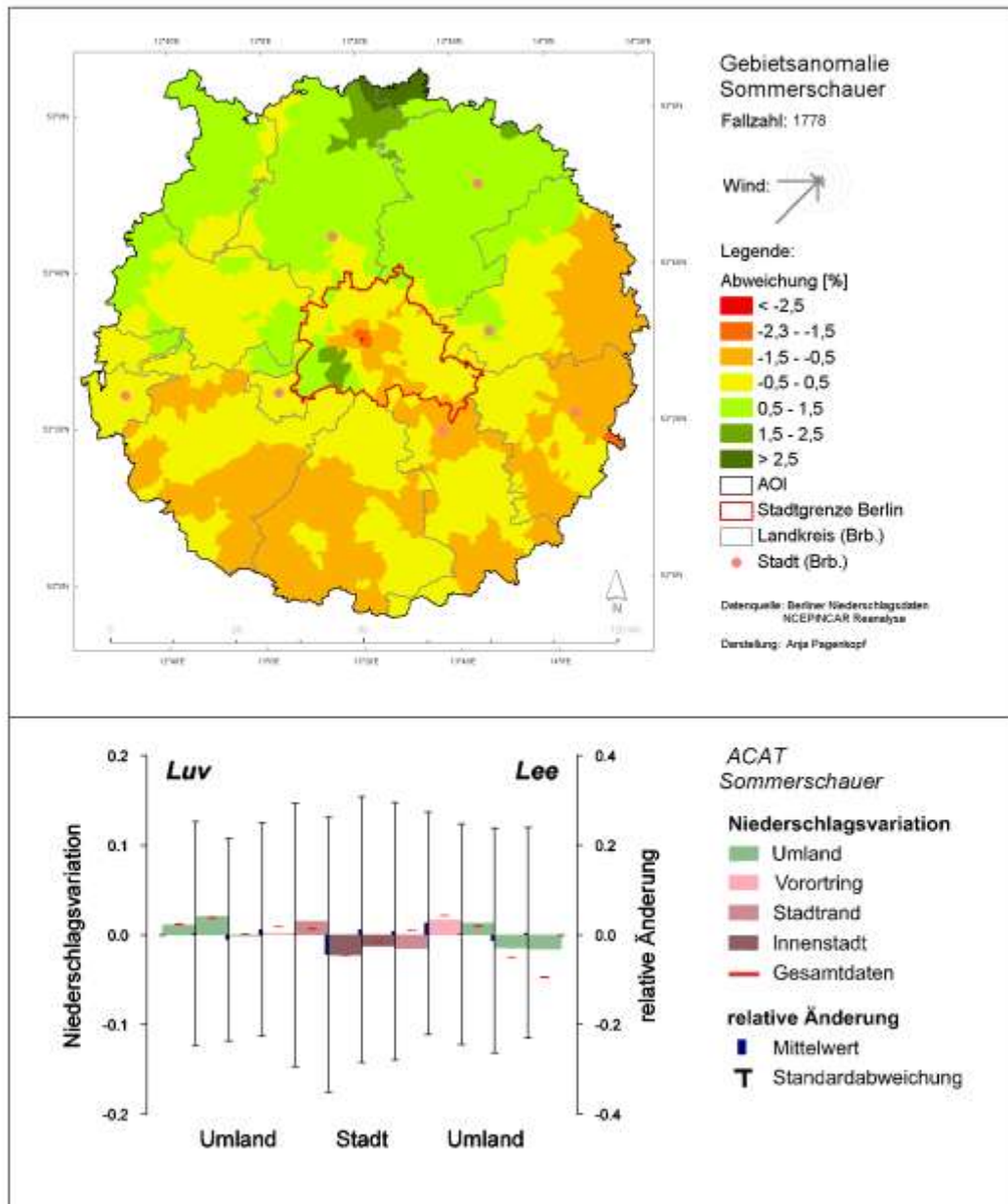
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit

Name: **Sommerschauer**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern in Berlin Tempelhof in den drei Sommermonaten

Fallzahl: 1778 mittlere Gesamtsumme: 5985 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 15 % mittlere Niederschlagshöhe: 3,4 mm



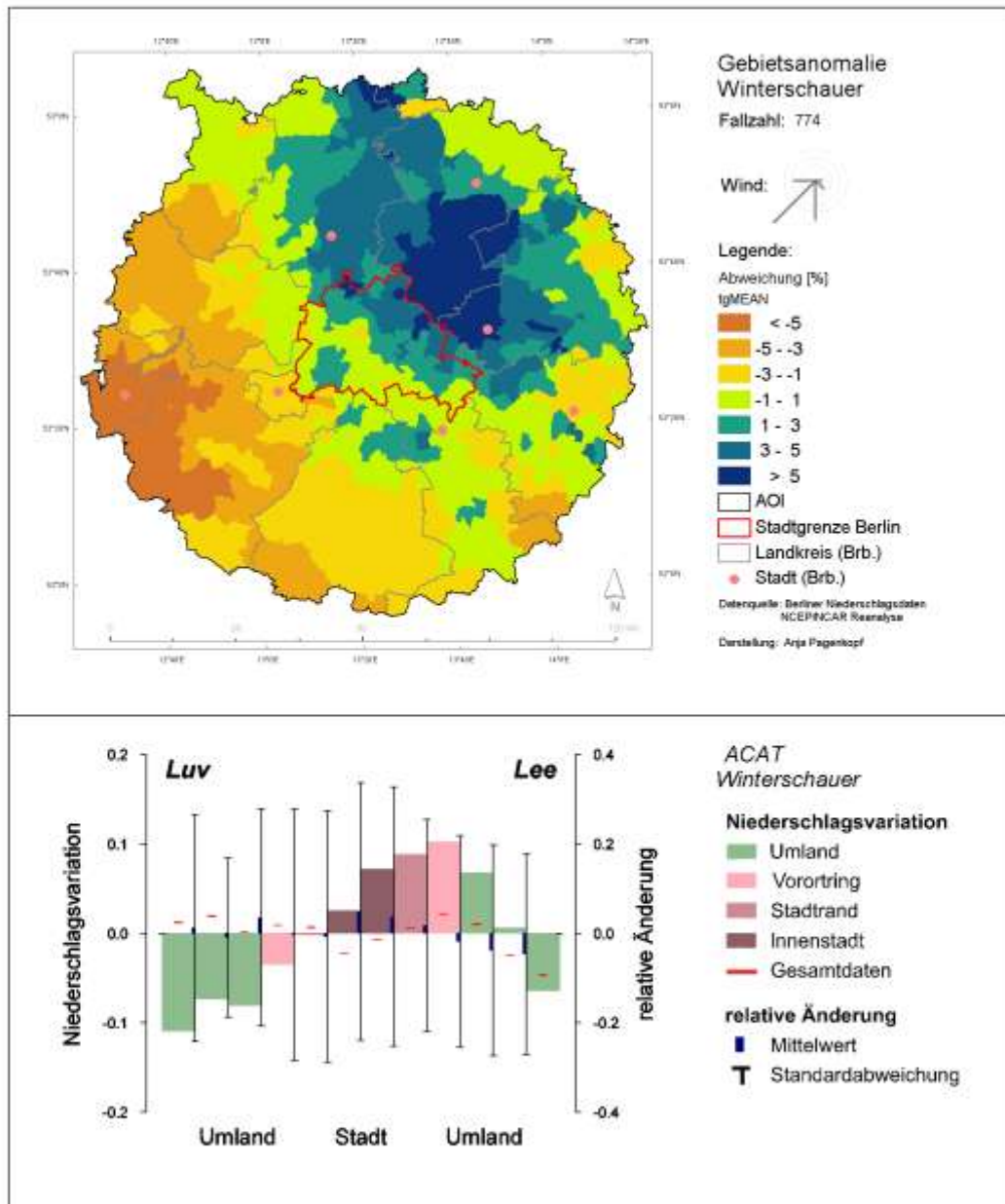
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit

Name: **Winterschauer**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern in Berlin Tempelhof in den drei Wintermonaten

Fallzahl: 774 mittlere Gesamtsumme: 1827 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 6,5 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm



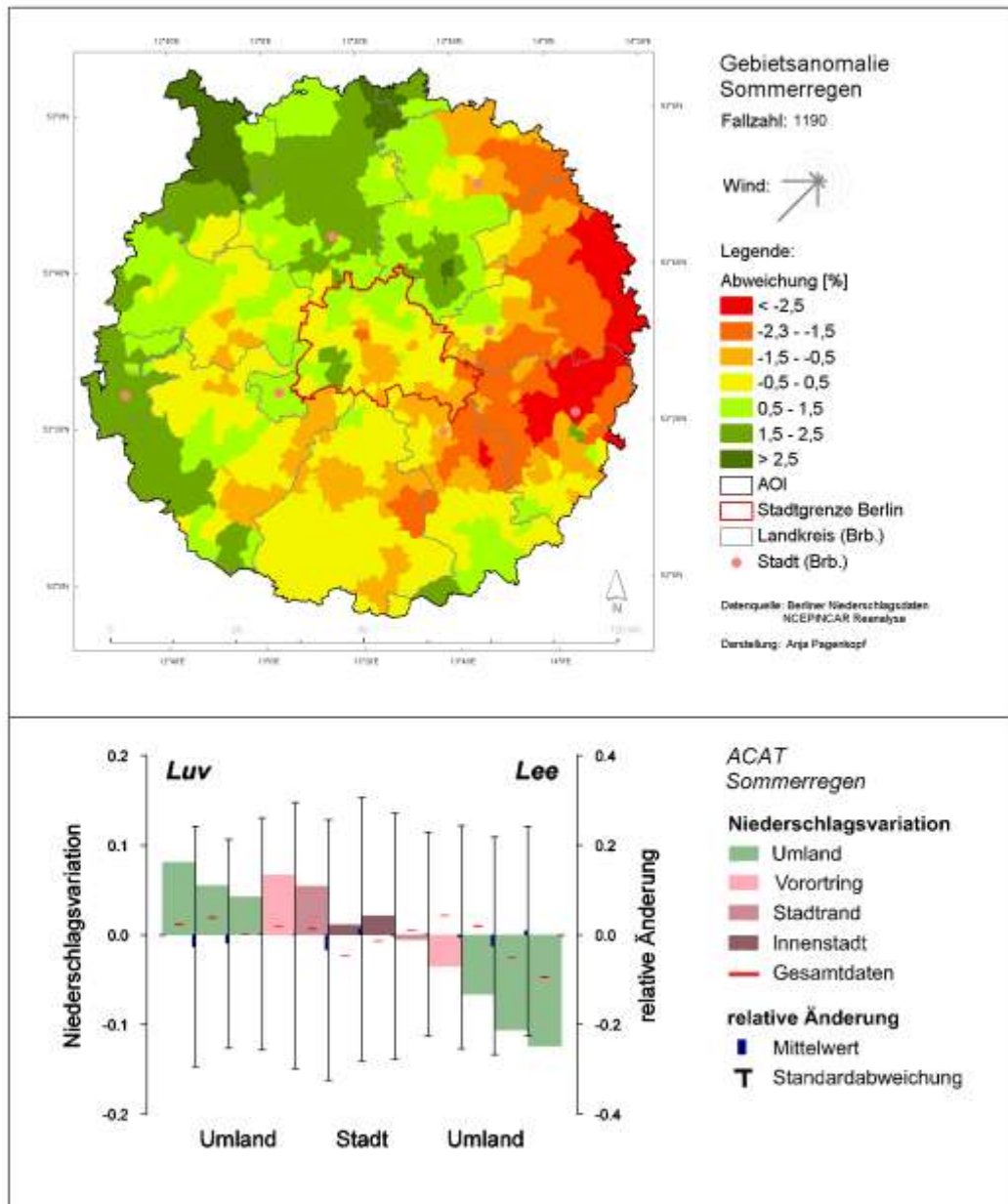
zweifakorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit

Name: **Sommerregen**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen in Berlin Tempelhof in den drei Sommermonaten

Fallzahl: 1190 mittlere Gesamtsumme: 3134 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 10 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,6 mm



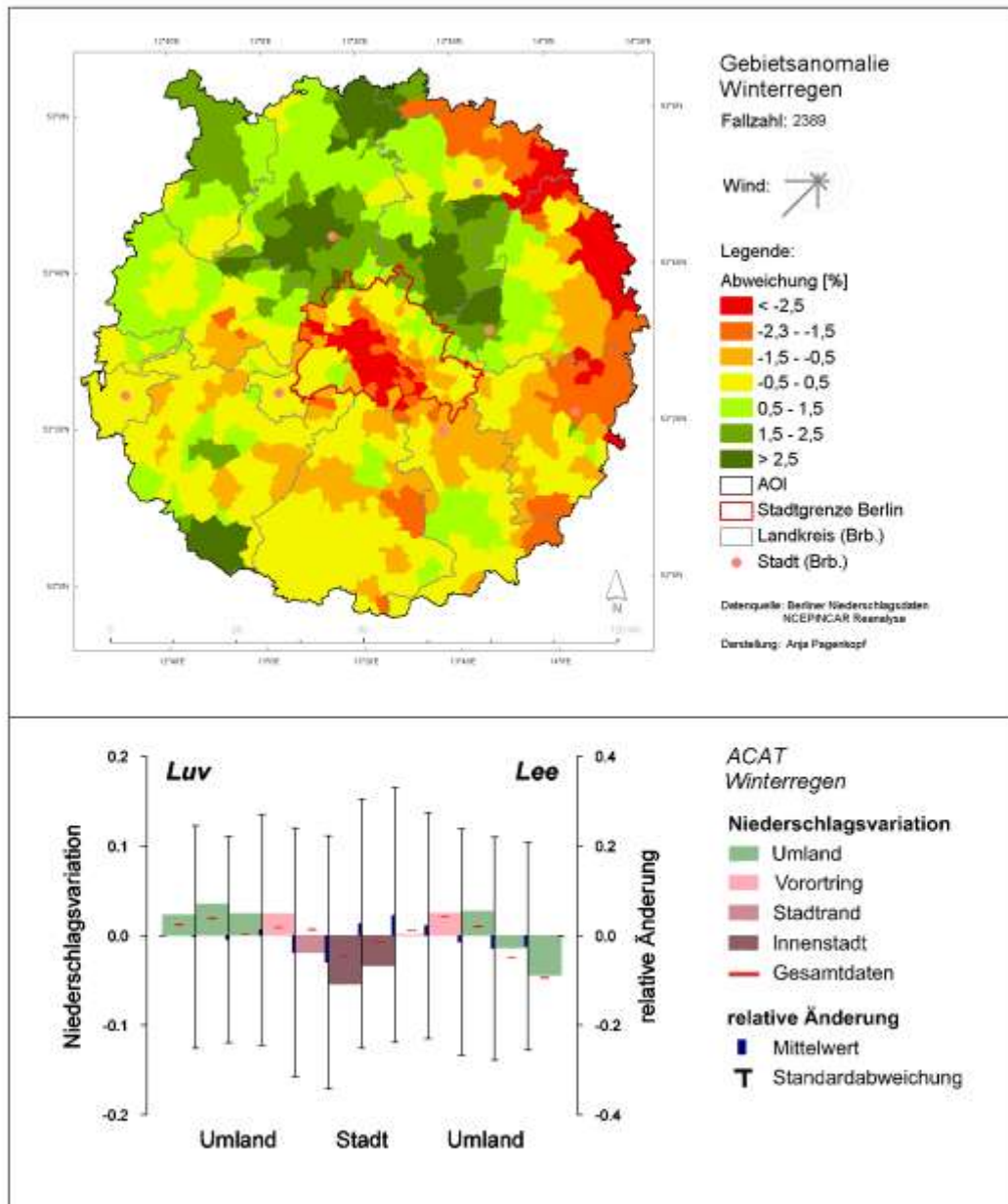
zweifakorielles Experiment: Niederschlagstyp, Jahreszeit

Name: **Winterregen**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen in Berlin Tempelhof in den drei Wintermonaten

Fallzahl: 2389 mittlere Gesamtsumme: 4317 mm

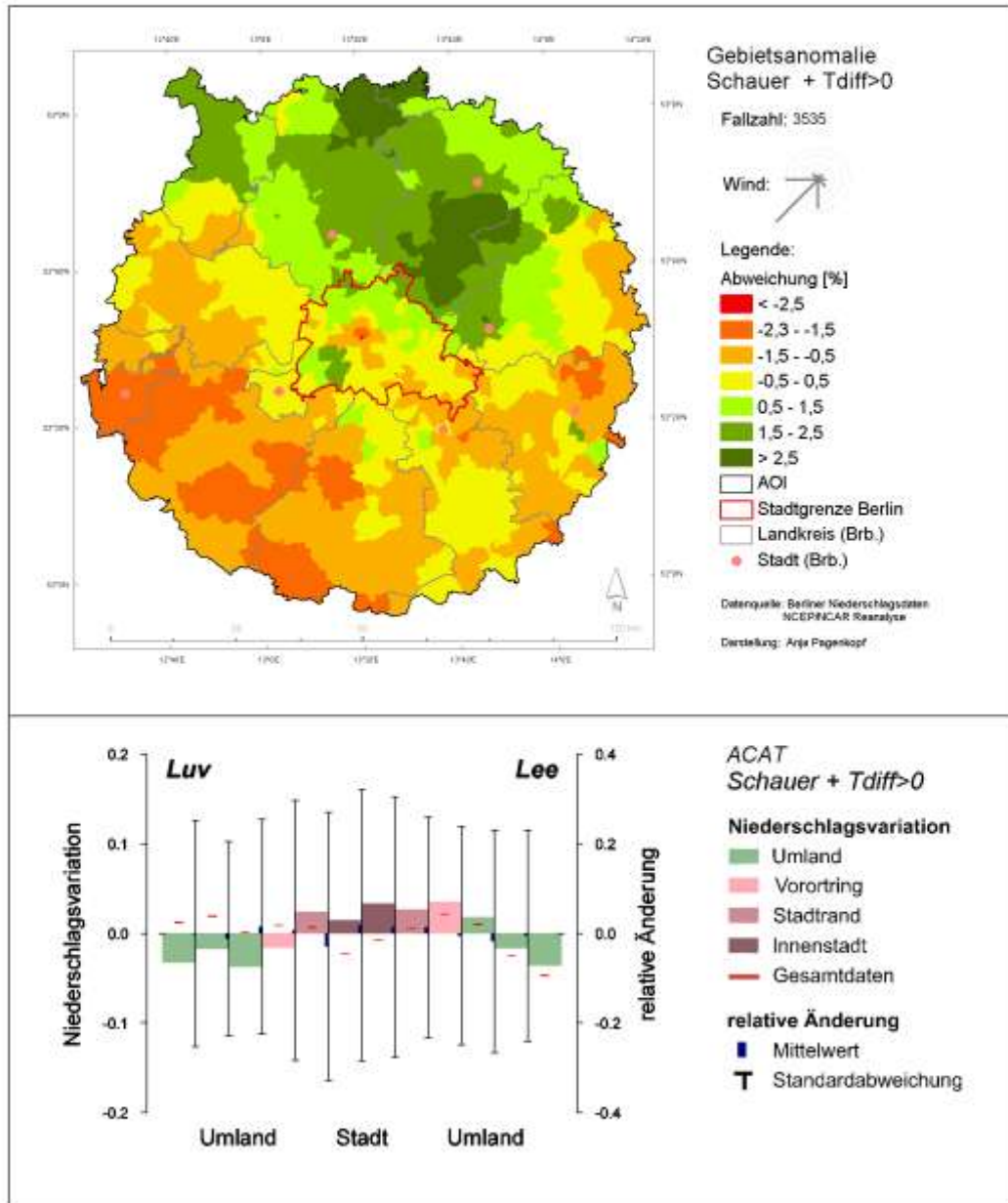
Anteil an allen Niederschlagstagen: 20 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,7 mm



Name: Schauer mit Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Schauer an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten

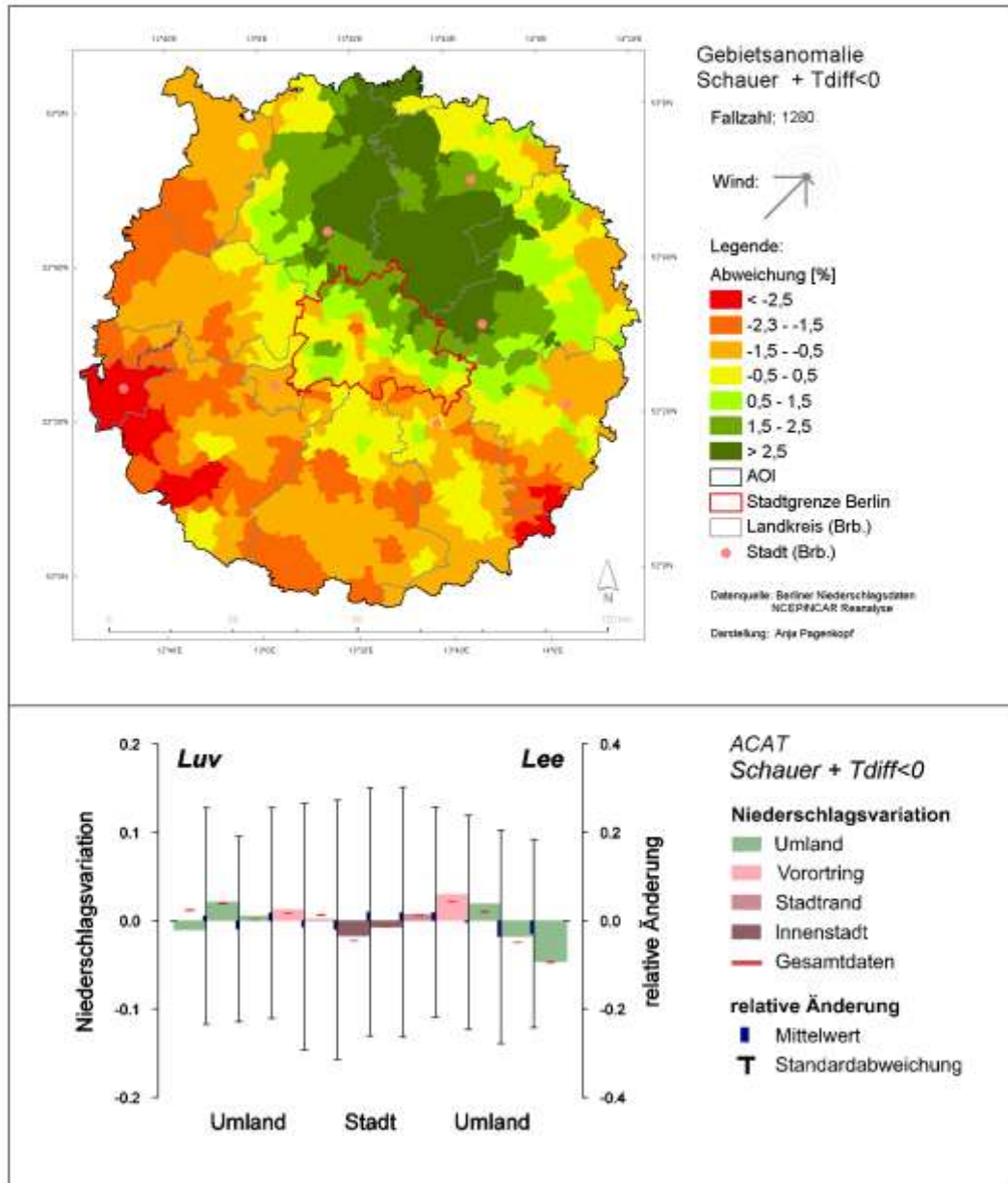
Fallzahl: 3535 mittlere Gesamtsumme: 8786 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 30 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,5 mm



Name: Schauer ohne Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Schauer an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof niedriger ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten

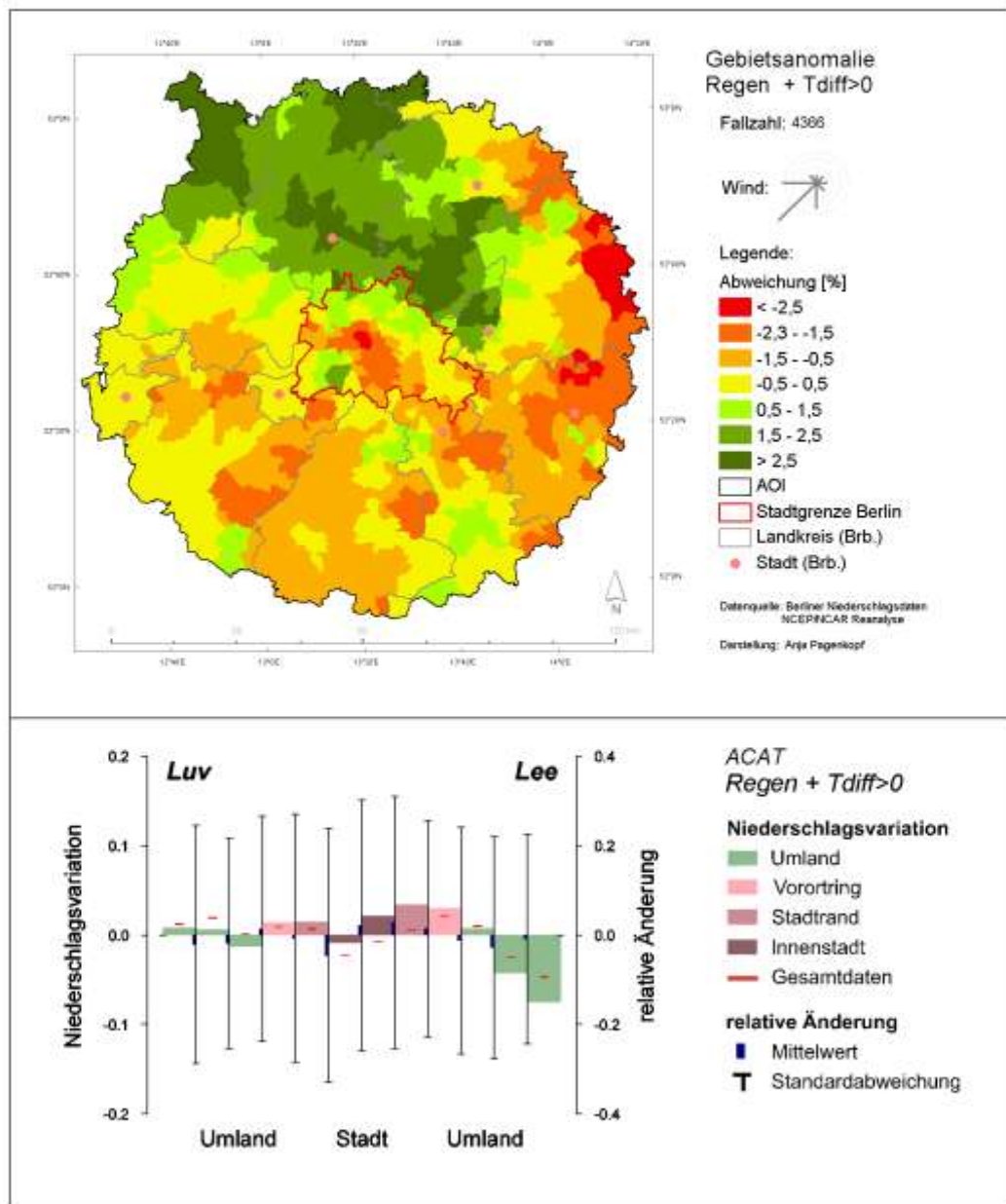
Fallzahl: 1280 mittlere Gesamtsumme: 4589 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 11 % mittlere Niederschlagshöhe: 3,6 mm



Name: Regen mit Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Regen an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten

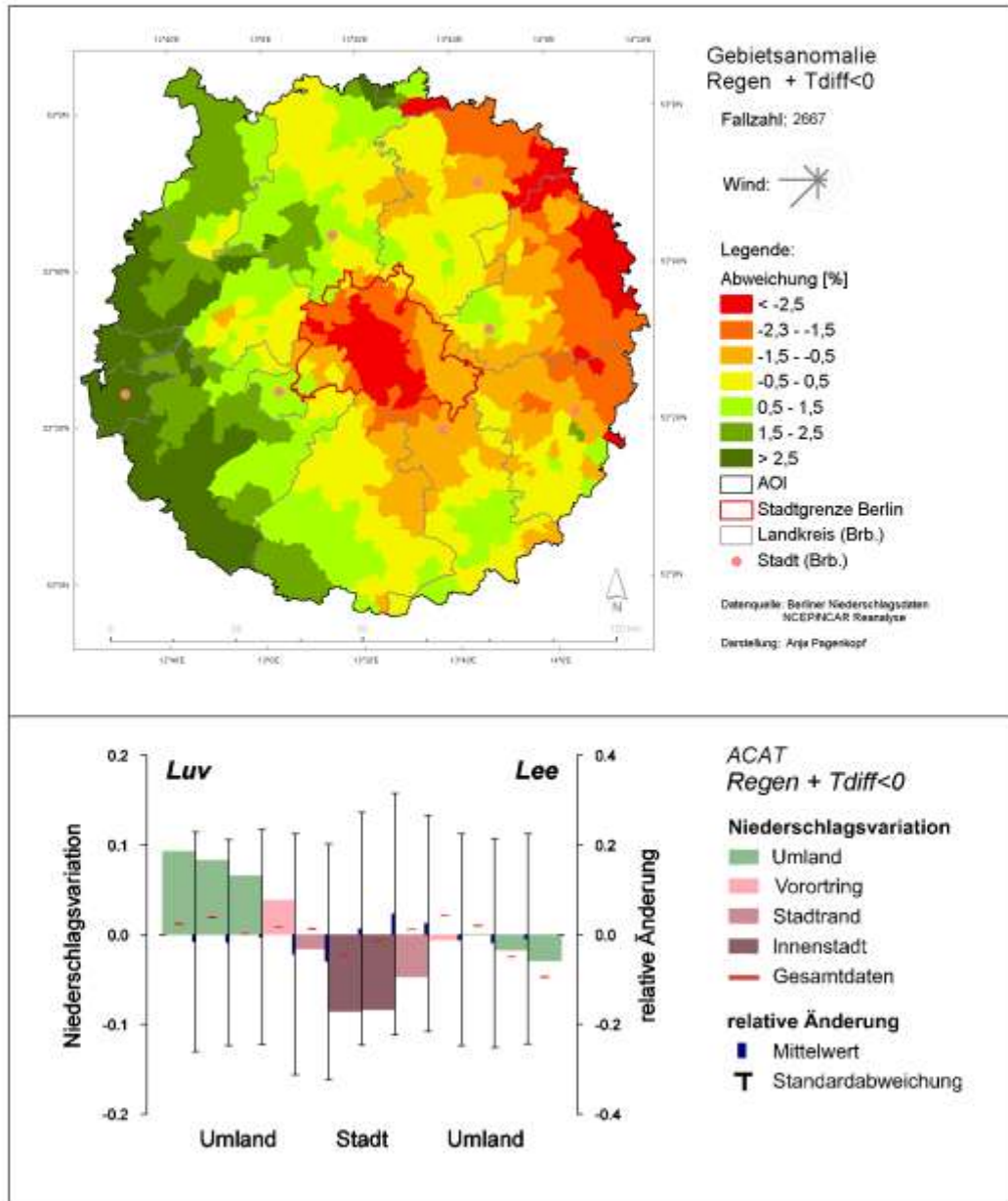
Fallzahl: 4366 mittlere Gesamtsumme: 7220 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 37 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm



Name: Regen ohne Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Regen an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten

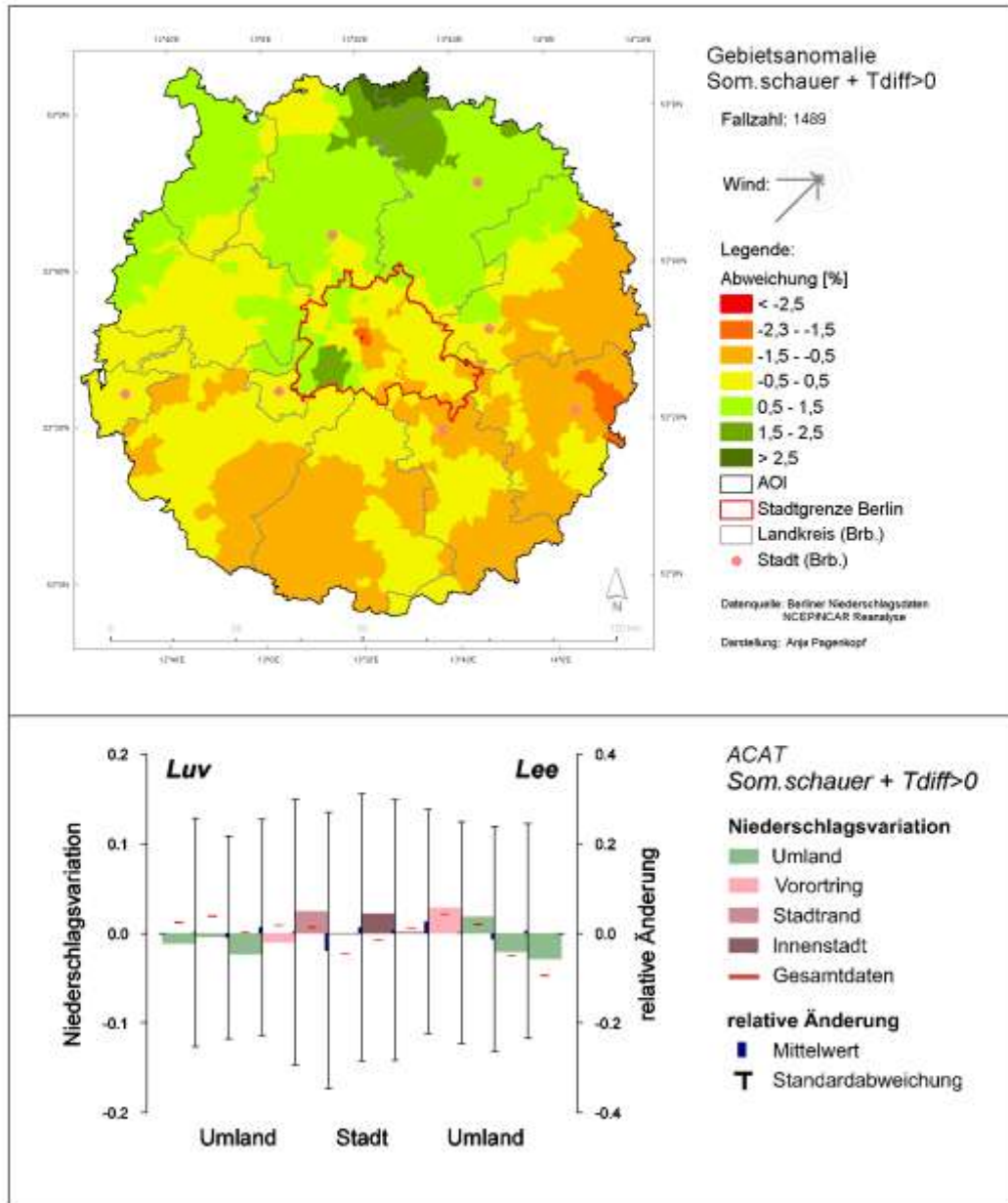
Fallzahl: 2667 mittlere Gesamtsumme: 7060 mm
 Anteil an allen Niederschlagstagen: 23 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,6 mm



Name: Sommerschauer mit Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Schauer an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Sommermonaten

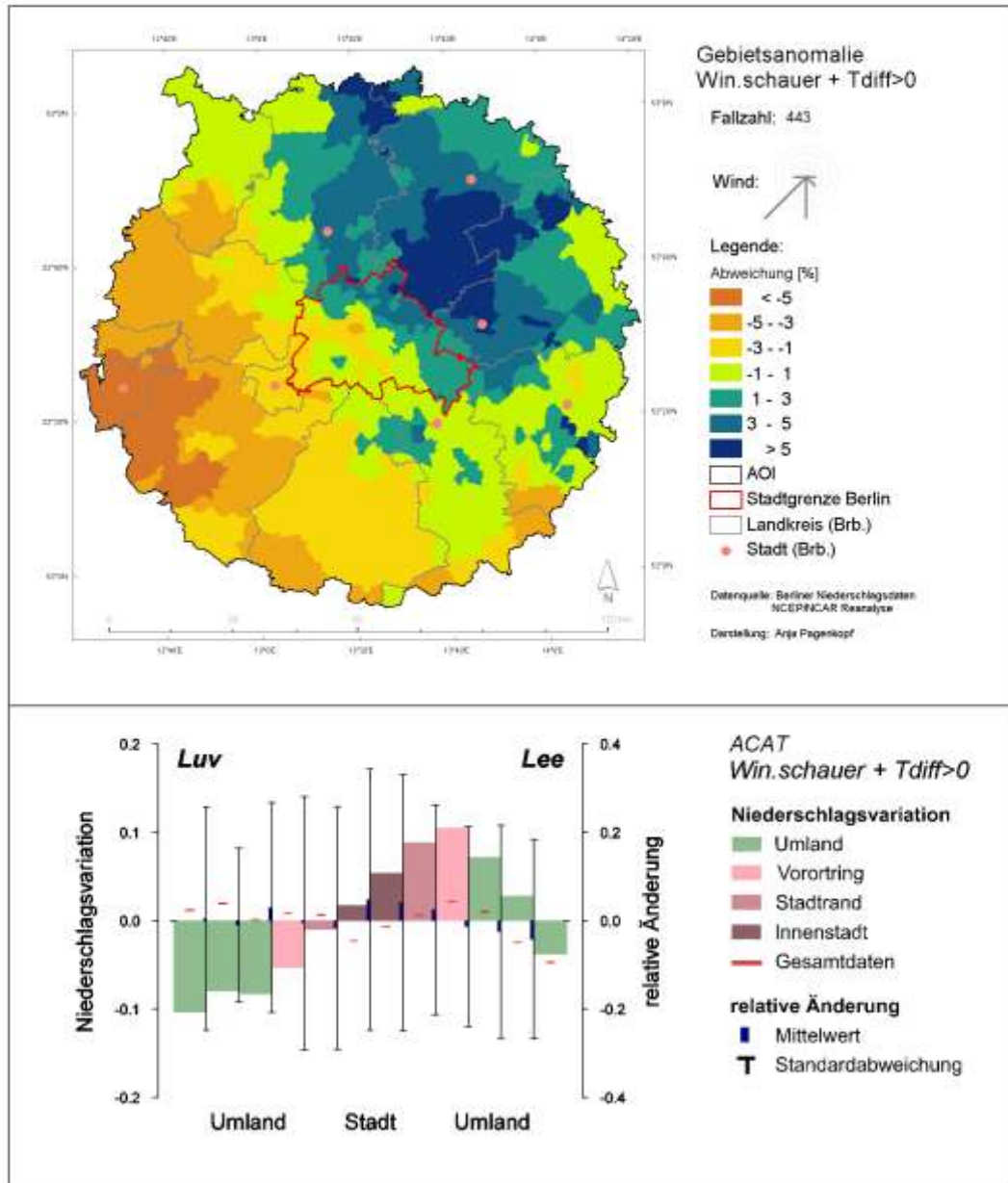
Fallzahl: 1489 mittlere Gesamtsumme: 4324 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 13 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,9 mm



Name: Winterschauer mit Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Schauer an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Wintermonaten

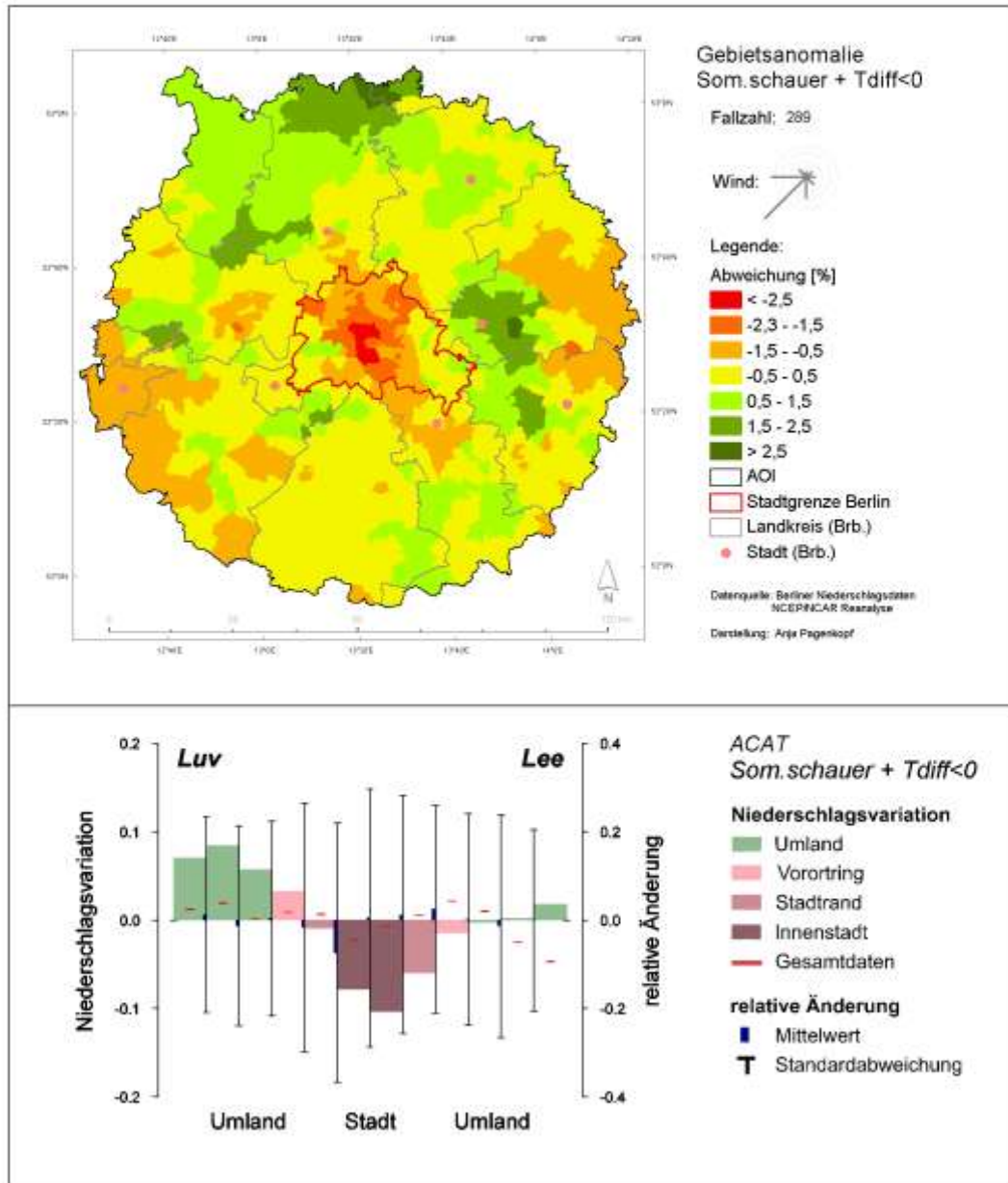
Fallzahl: 443 mittlere Gesamtsumme: 903 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 3,7 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,0 mm



Name: Sommerschauer ohne Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Schauer an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof niedriger ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Sommermonaten

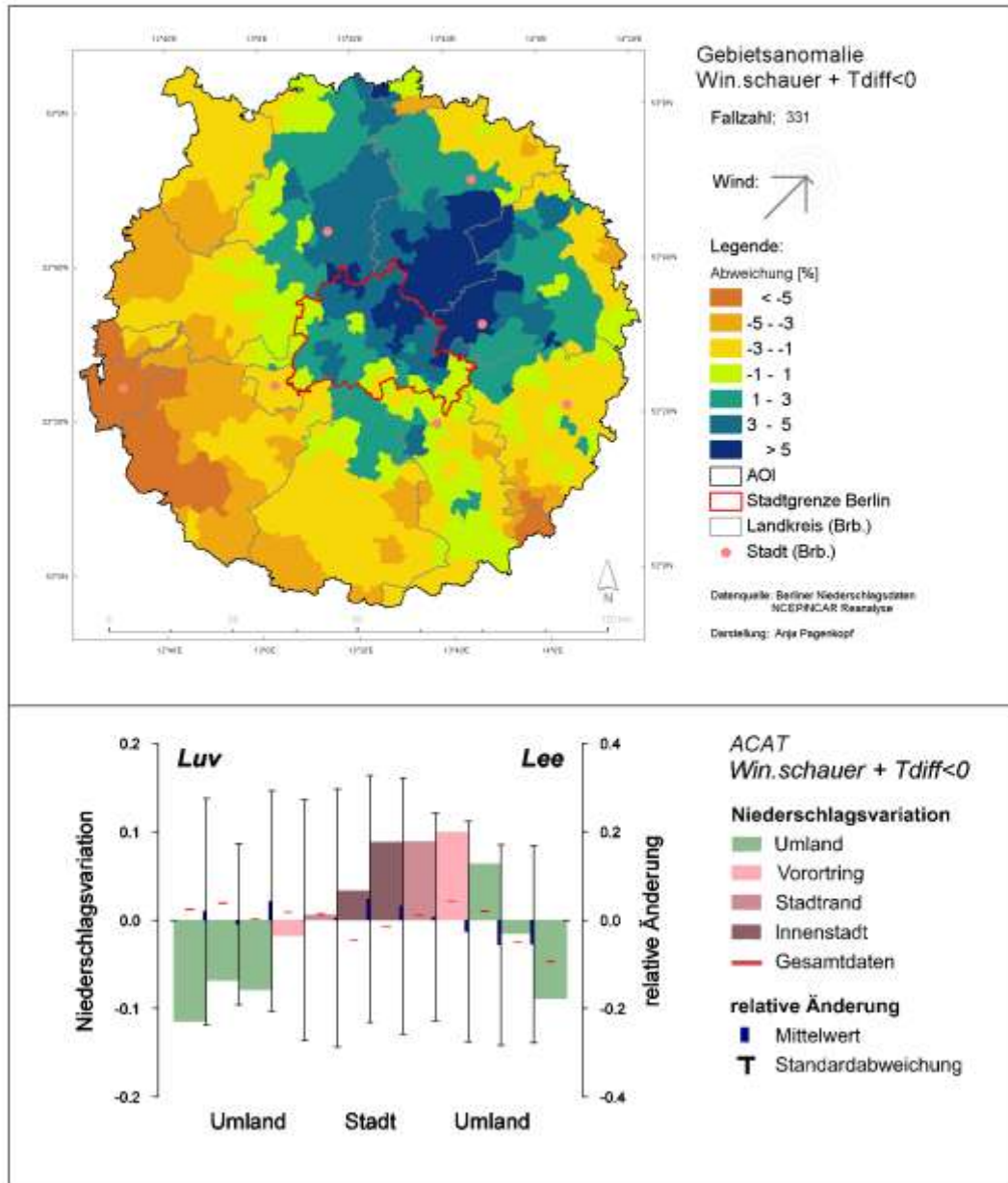
Fallzahl: 289 mittlere Gesamtsumme: 1642 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 2,4 % mittlere Niederschlagshöhe: 5,7 mm



Name: **Winterschauer ohne Wärmeinsel**

Beschreibung: Tage an denen Schauer an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof niedriger ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Wintermonaten

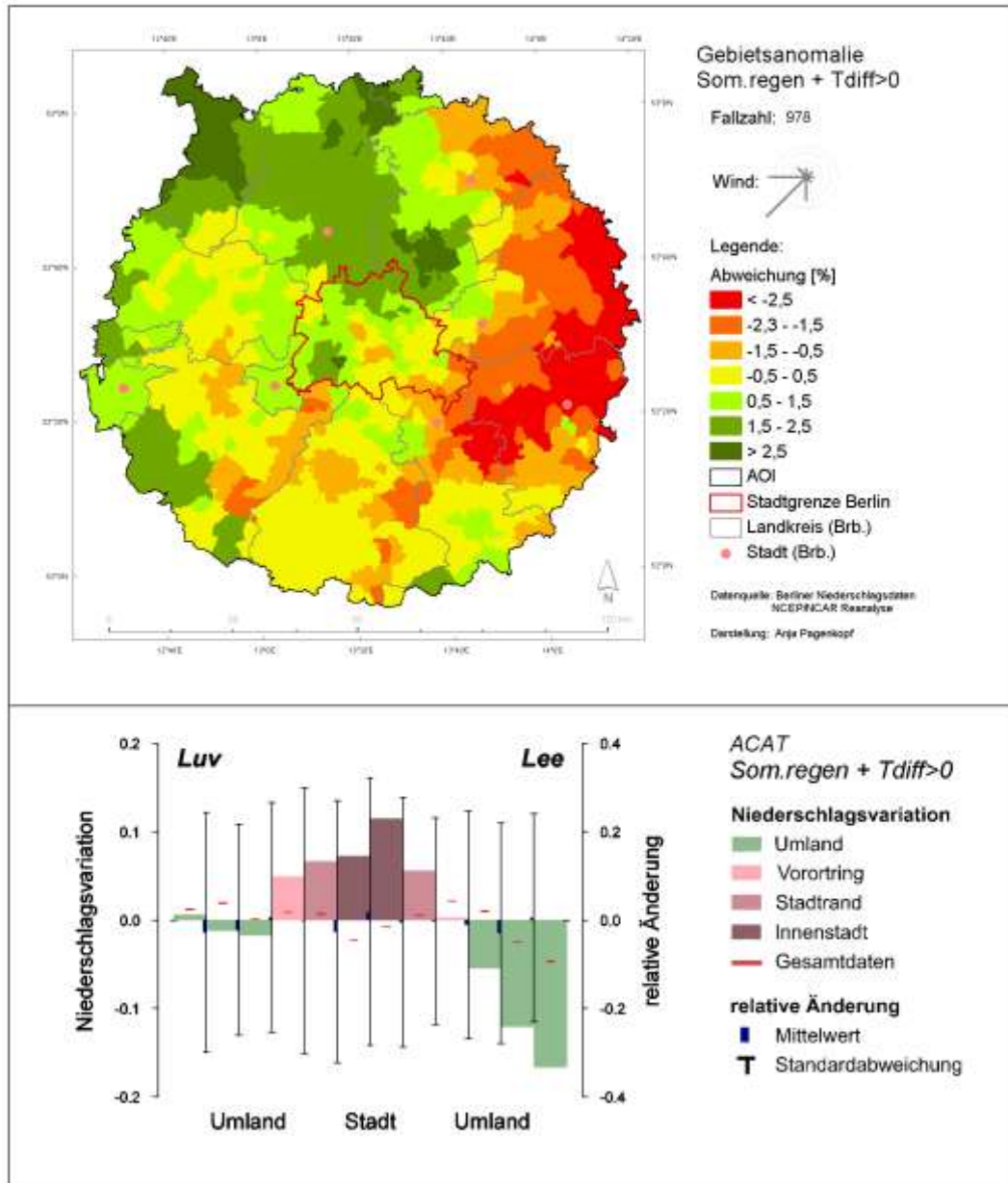
Fallzahl: 331 mittlere Gesamtsumme: 924 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 2,8 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,8 mm



Name: Sommerregen mit Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Regen an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Sommermonaten

Fallzahl: 978 mittlere Gesamtsumme: 1874 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 8,3 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,9 mm

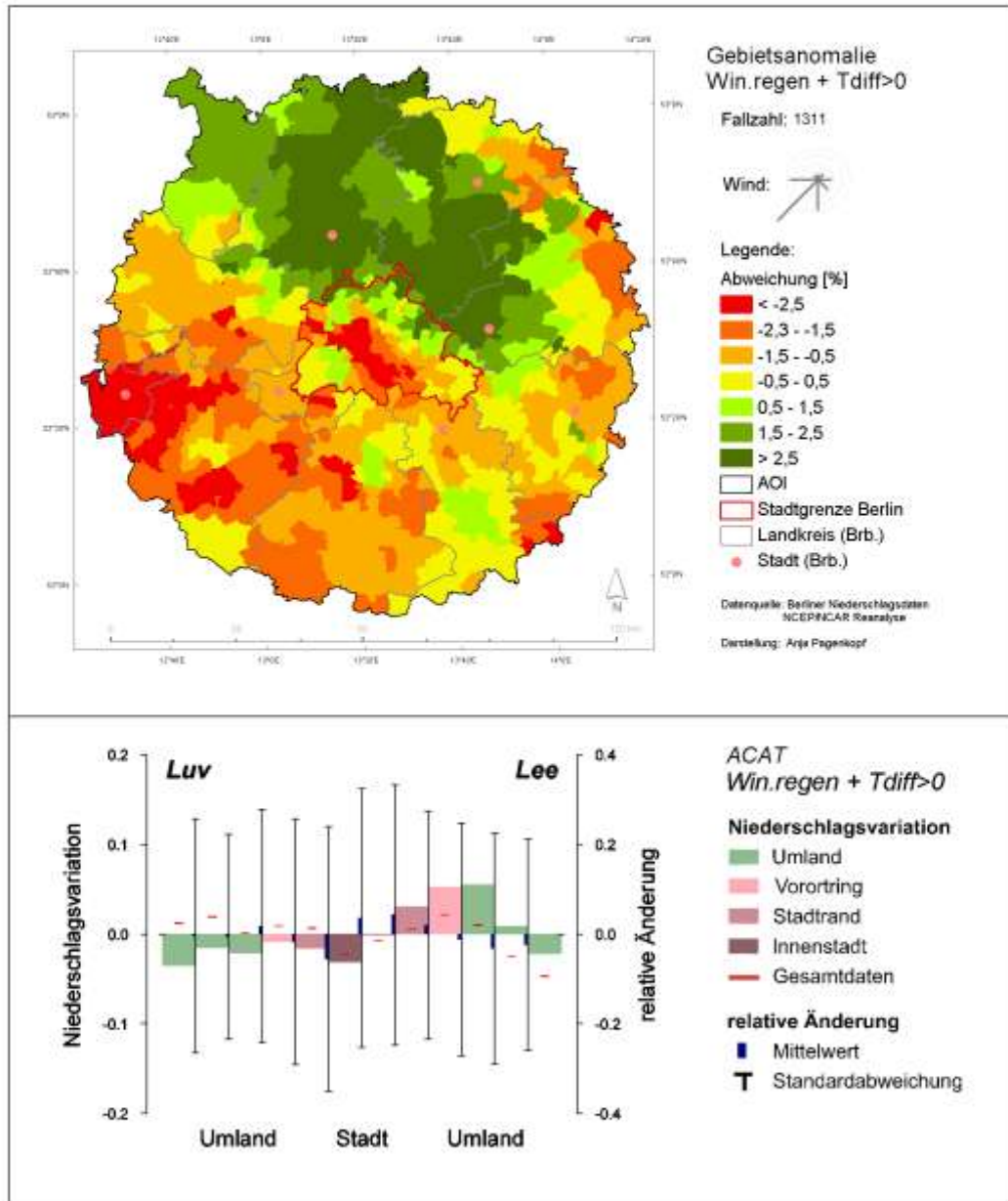


Name: **Winterregen ohne Wärmeinsel**

Beschreibung: Tage an denen Regen an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Wintermonaten

Fallzahl: 1311 mittlere Gesamtsumme: 2081 mm

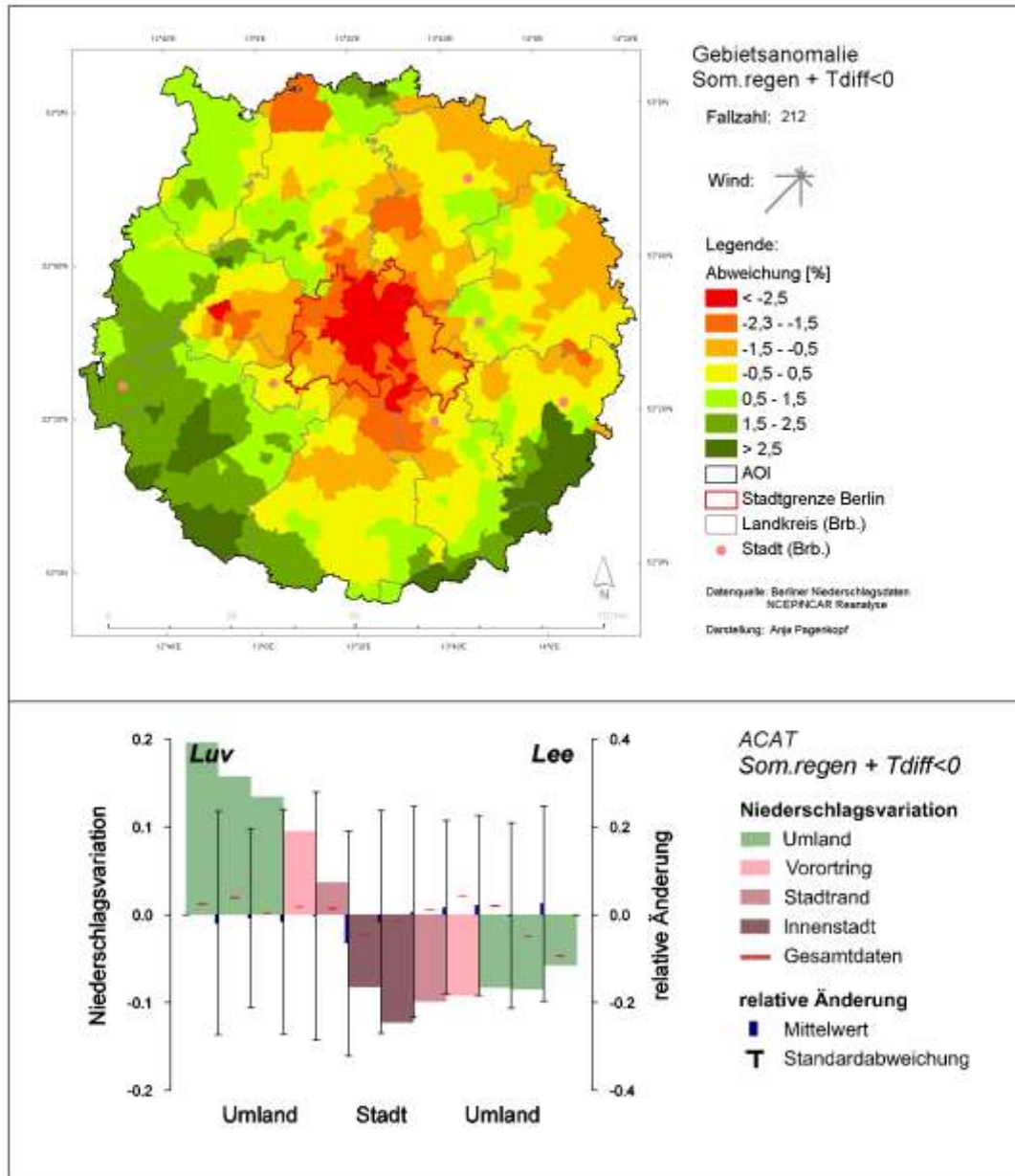
Anteil an allen Niederschlagstagen: 11 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm



Name: Sommerregen ohne Wärmeinsel

Beschreibung: Tage an denen Regen an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Sommermonaten

Fallzahl: 212 mittlere Gesamtsumme: 1260 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 1,8 % mittlere Niederschlagshöhe: 5,9 mm

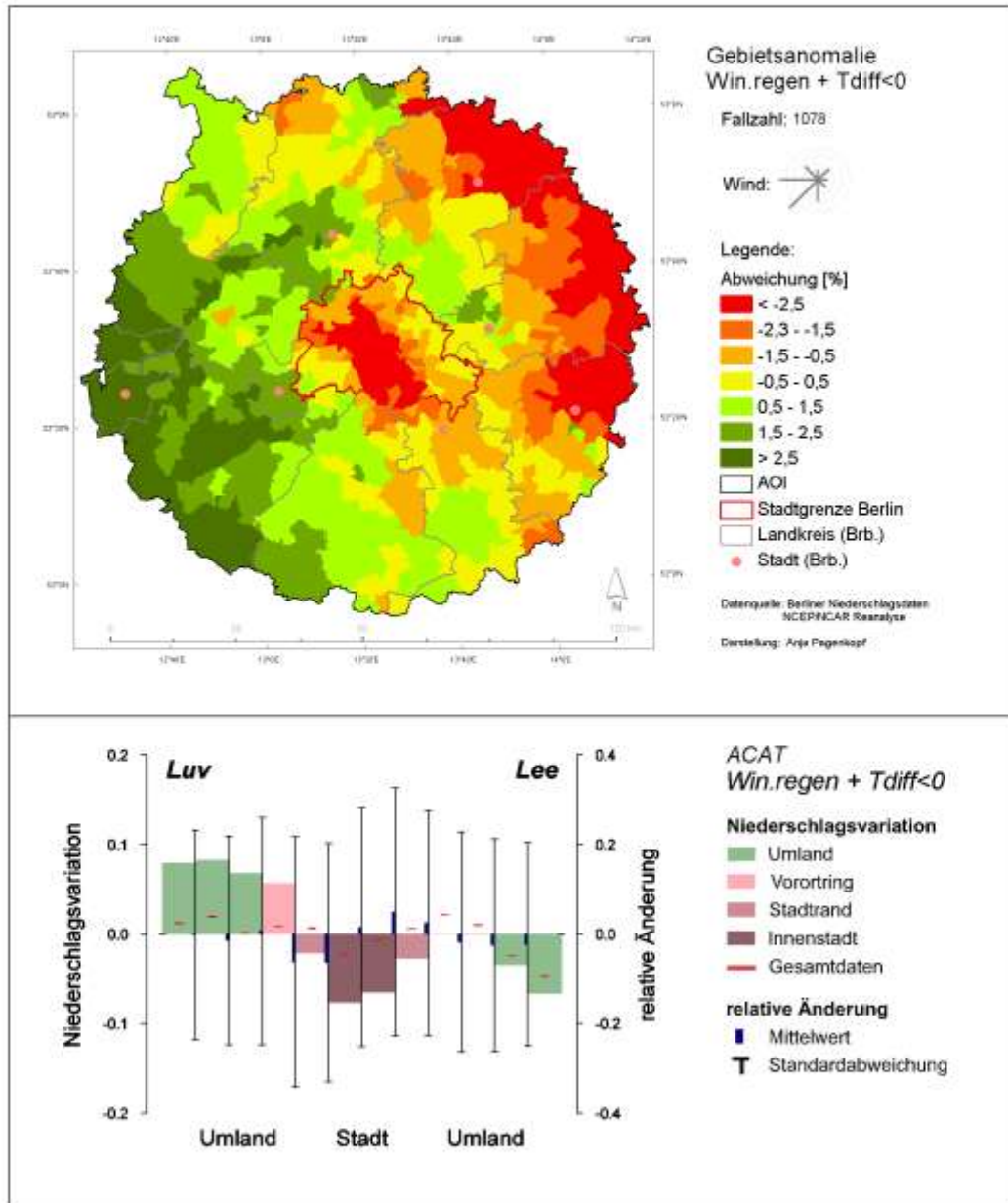


Name: **Winterregen ohne Wärmeinsel**

Beschreibung: Tage an denen Regen an der Station Berlin-Tempelhof beobachtet wurden und die Tagesmitteltemperatur in Berlin-Tempelhof höher ist als das Gebietsmittel der NCEP-NCAR Reanalysedaten in den drei Wintermonaten

Fallzahl: 1078 mittlere Gesamtsumme: 2236 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 9,1 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,1 mm



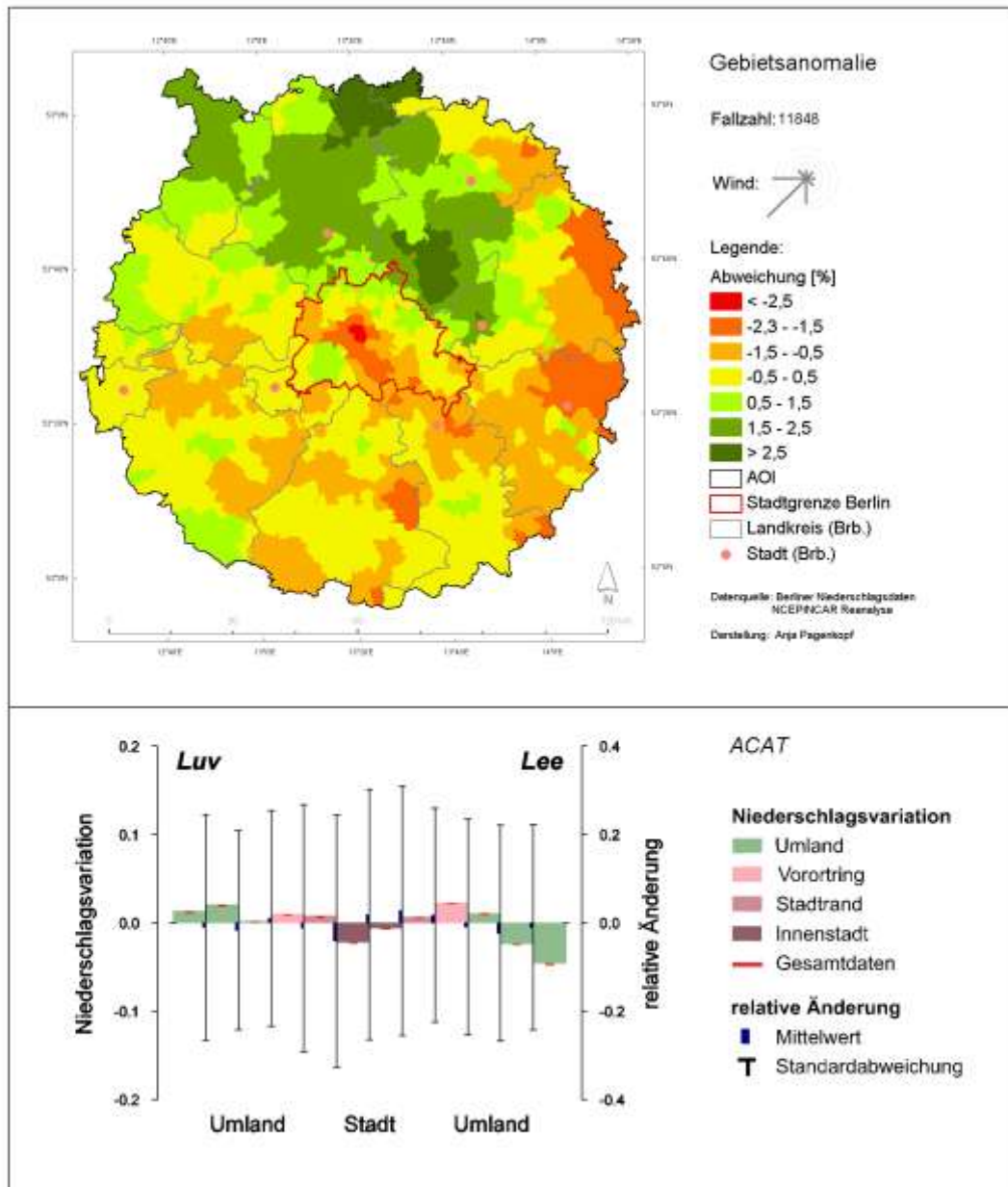
einfaktorielles Experiment: Niederschlagsintensität

Name: **alle Niederschlagstage**

Beschreibung: umfasst alle Niederschlagstage im Untersuchungszeitraum 1951-2000

Fallzahl: 11848 mittlere Gesamtsumme: 27656 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 100 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,3 mm

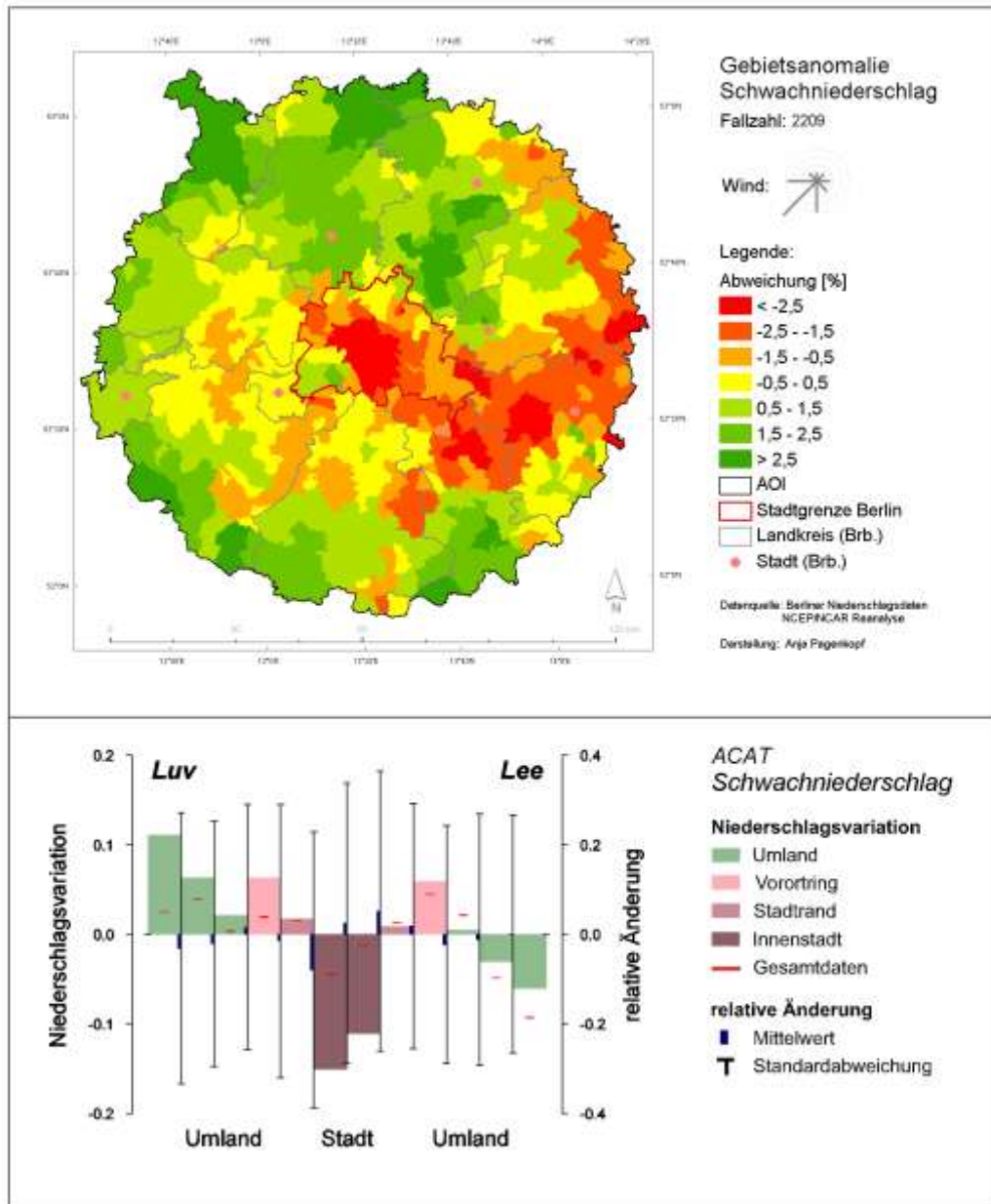


Name: **Schwachniederschlagstage**

Beschreibung: Tage an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet $\leq 1,5$ mm beträgt

Fallzahl: 2209 mittlere Gesamtsumme: 336 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 19 % mittlere Niederschlagshöhe: 0,15 mm



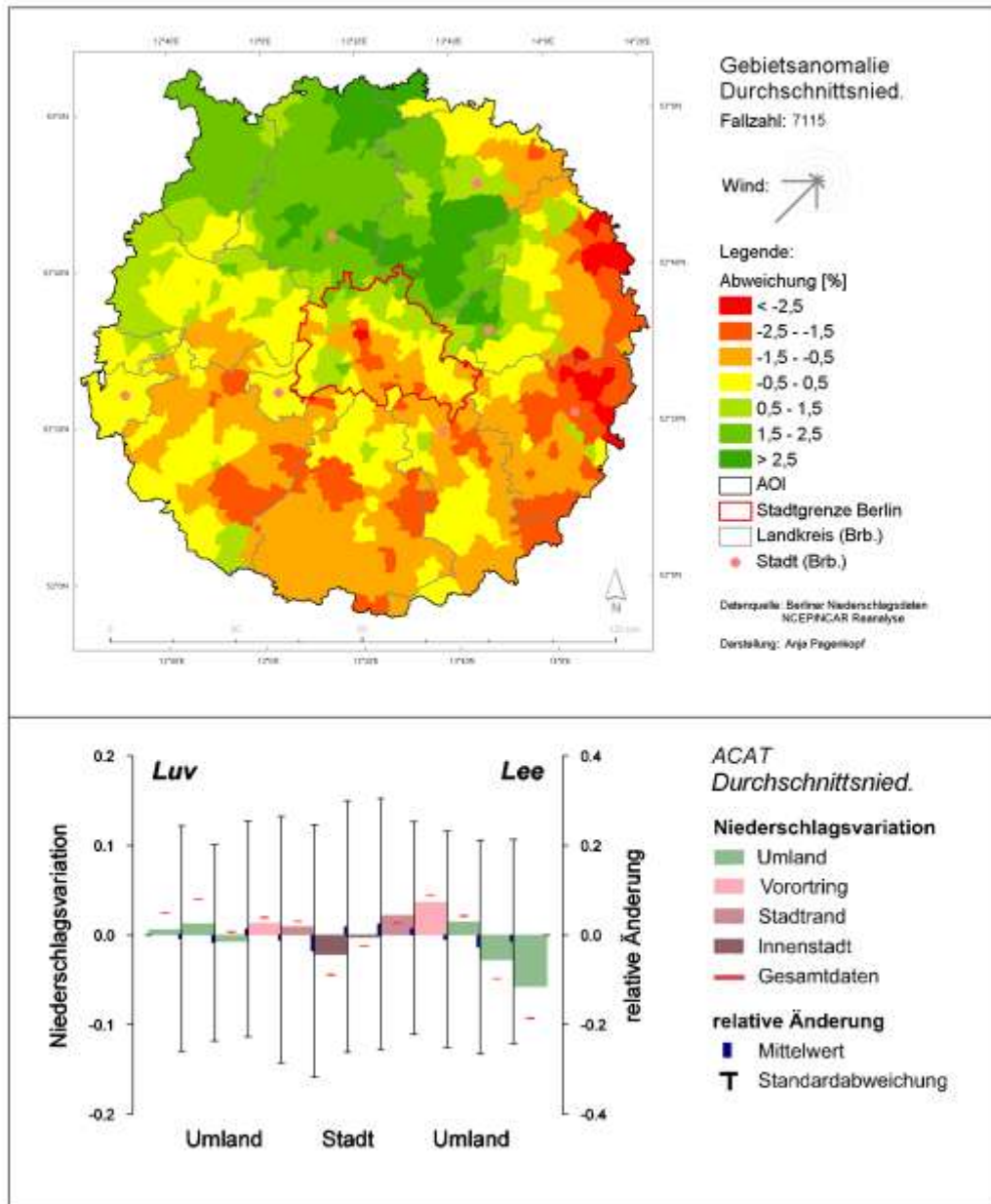
einfaktorielles Experiment: Niederschlagsintensität

Name: **Durchschnittsniederschlagstage**

Beschreibung: Tage an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 1,5 mm und 10 mm liegt

Fallzahl: 7115 mittlere Gesamtsumme: 11167 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 60 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm

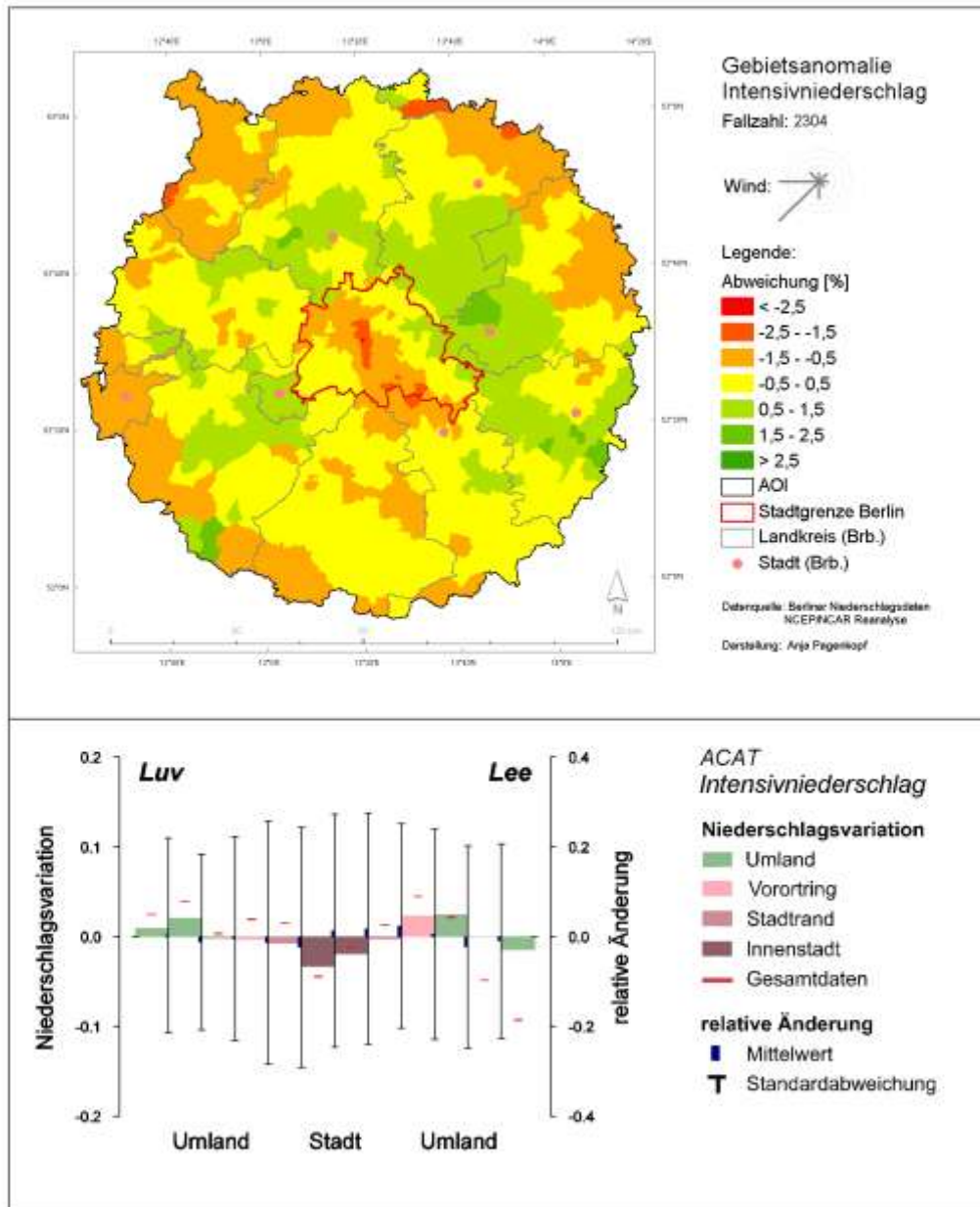


Name: **Intensivniederschlagstage**

Beschreibung: Tage an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 10 mm und 30 mm liegt

Fallzahl: 2304 mittlere Gesamtsumme: 13102 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 19 % mittlere Niederschlagshöhe: 5,7 mm



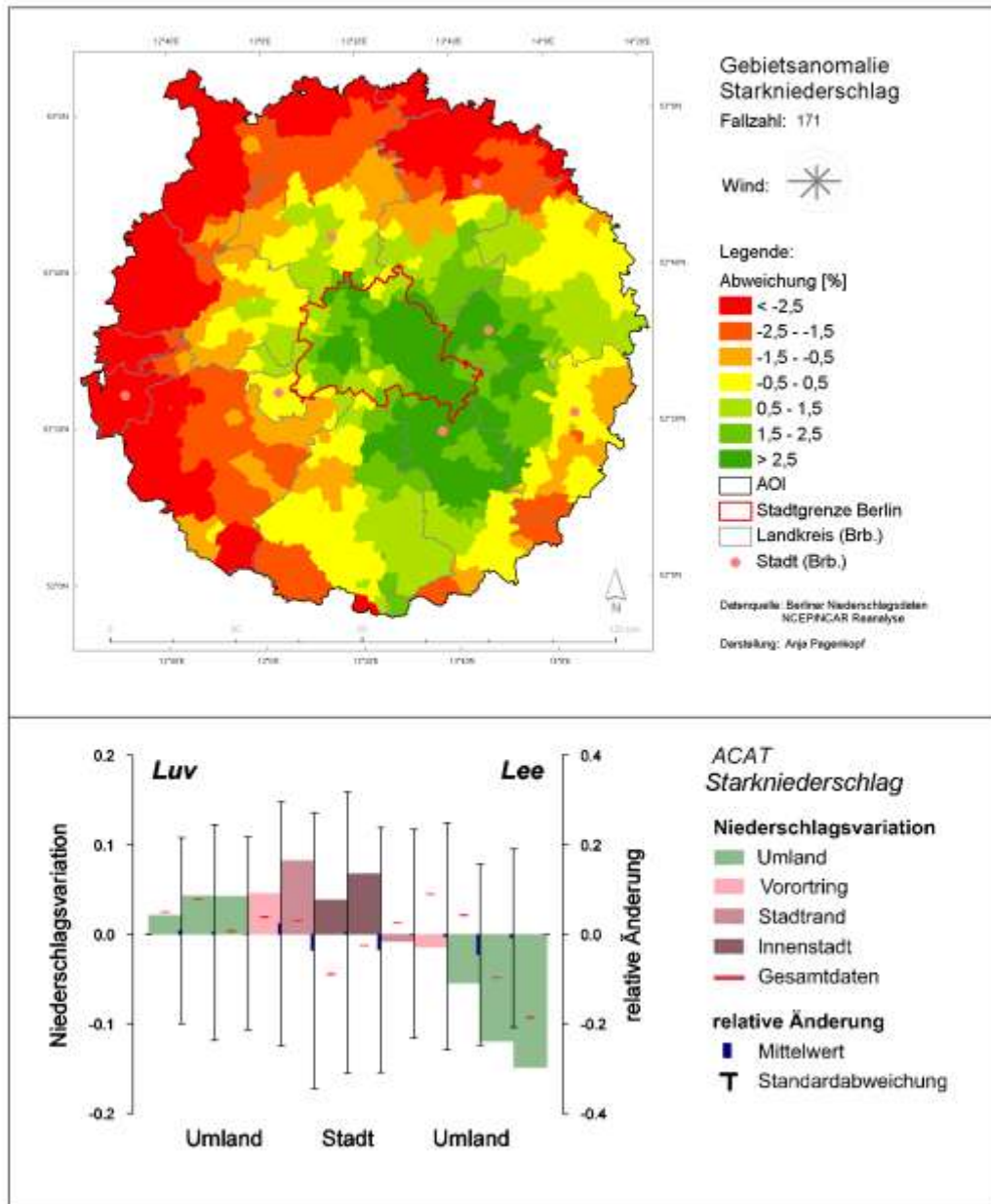
einfaktorielles Experiment: Niederschlagsintensität

Name: **Starkniederschlagstage**

Beschreibung: Tage an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 30 mm und 50 mm liegt

Fallzahl: 171 mittlere Gesamtsumme: 2049 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 1,4 % mittlere Niederschlagshöhe: 12 mm



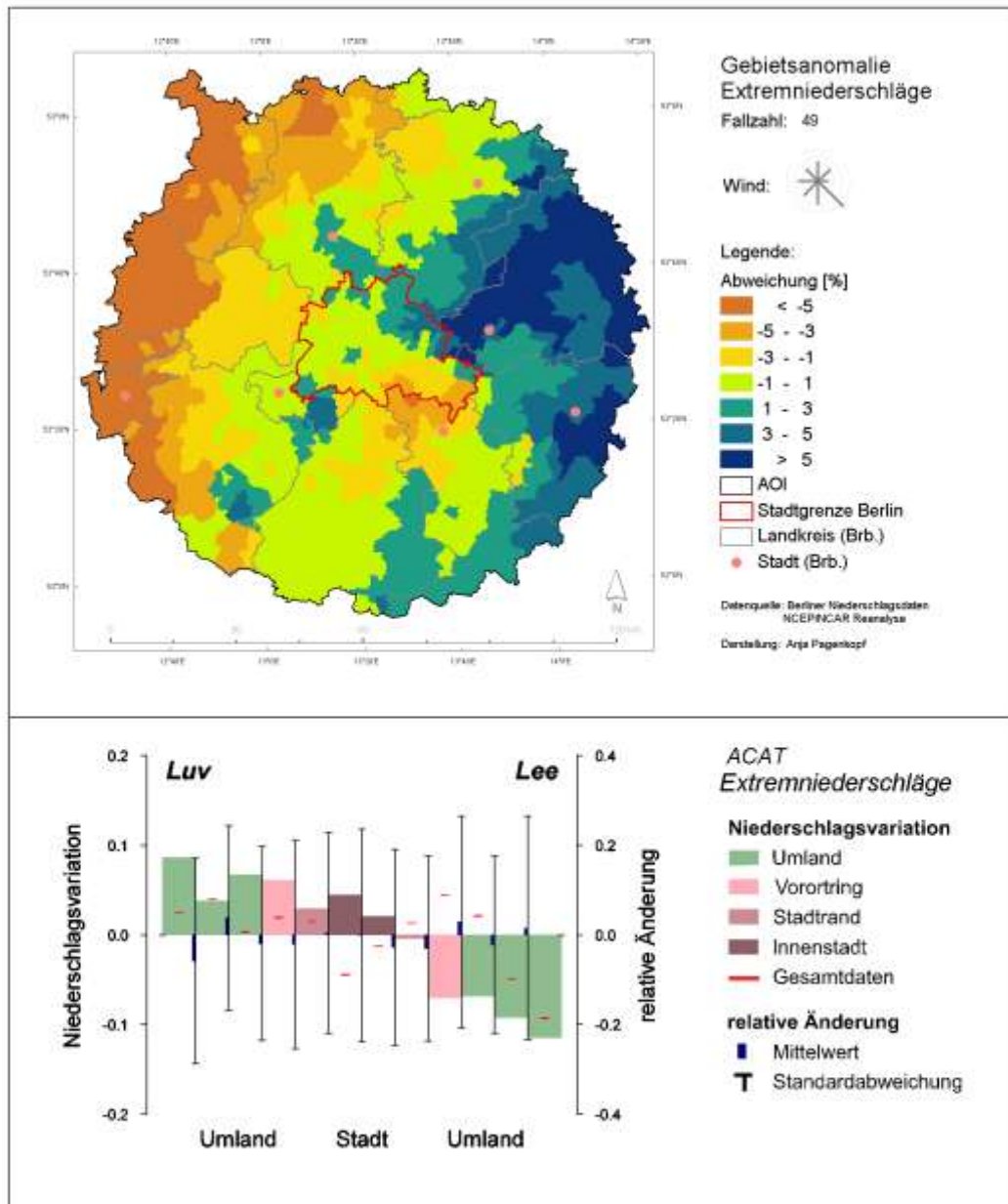
einfaktorielles Experiment: Niederschlagsintensität

Name: **Extremniederschlagstage**

Beschreibung: Tage an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet über 50 mm liegt

Fallzahl: 49 mittlere Gesamtsumme: 1002 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 0,4 % mittlere Niederschlagshöhe: 20,4 mm



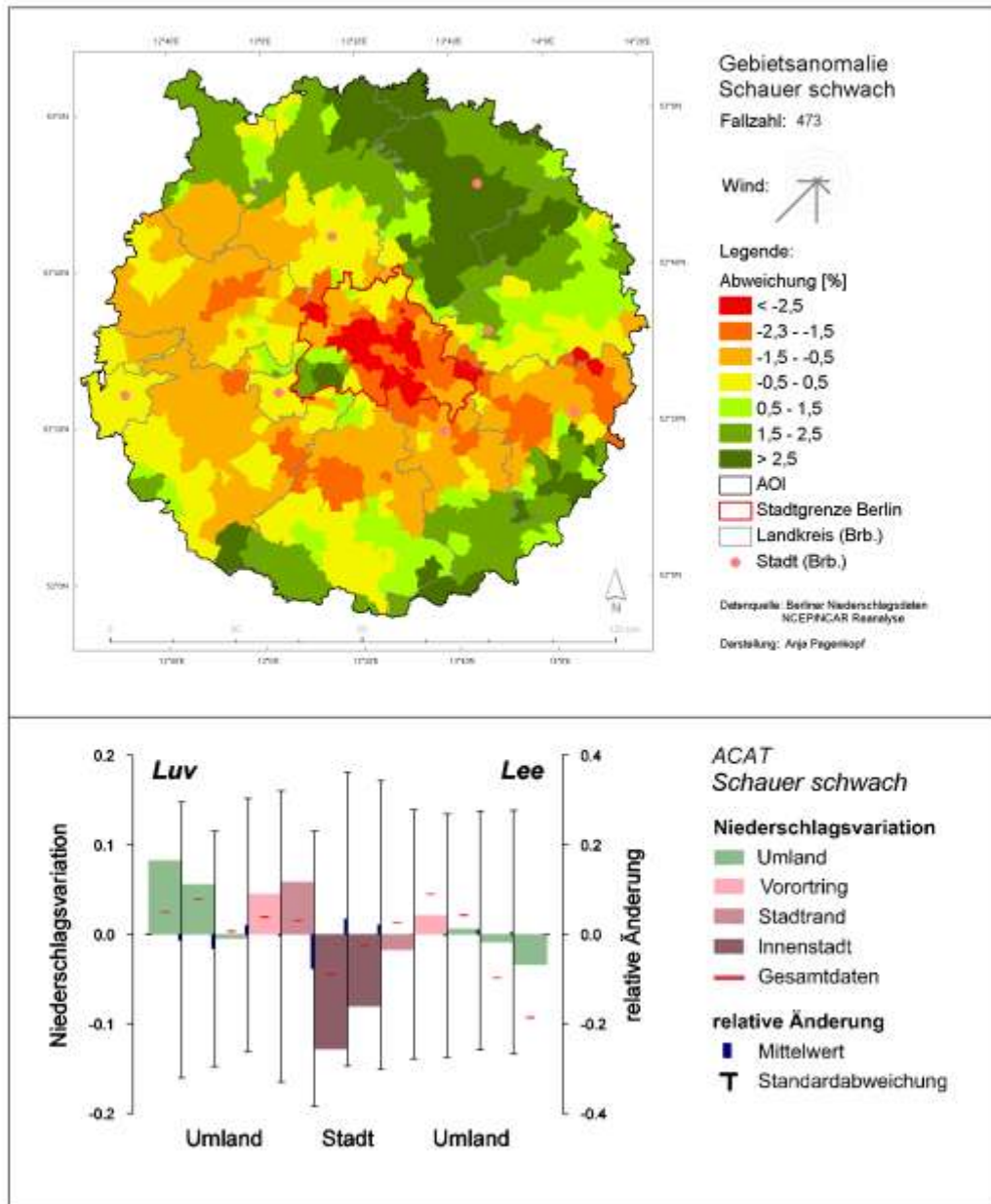
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

Name: **schwache Schauer**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet $\leq 1,5$ mm ist

Fallzahl: 473 mittlere Gesamtsumme: 77 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 4,0 % mittlere Niederschlagshöhe: 0,2 mm

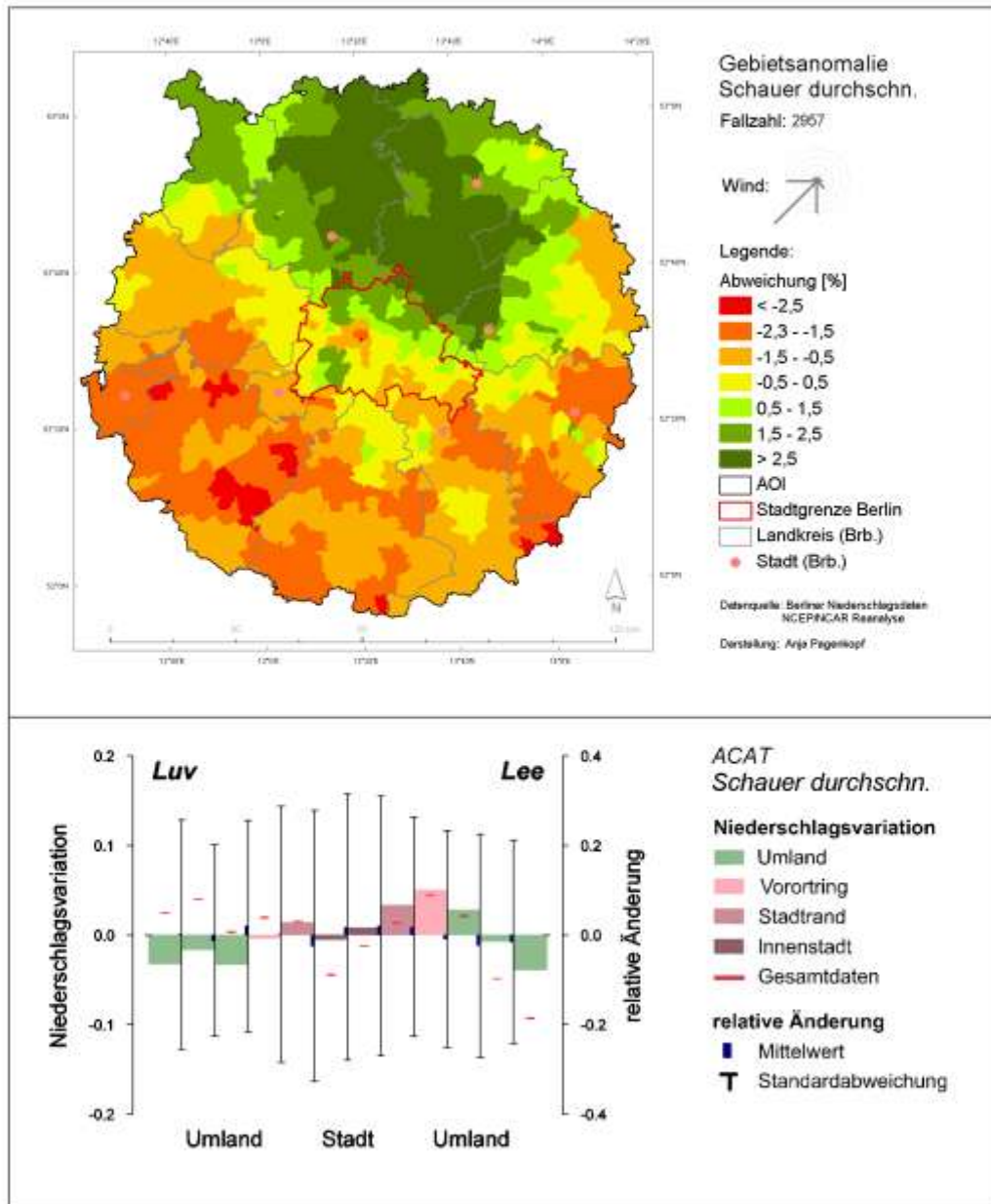


Name: **durchschnittliche Schauer**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 1,5 mm und 10 mm liegt

Fallzahl: 2957 mittlere Gesamtsumme: 4842 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 25 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm



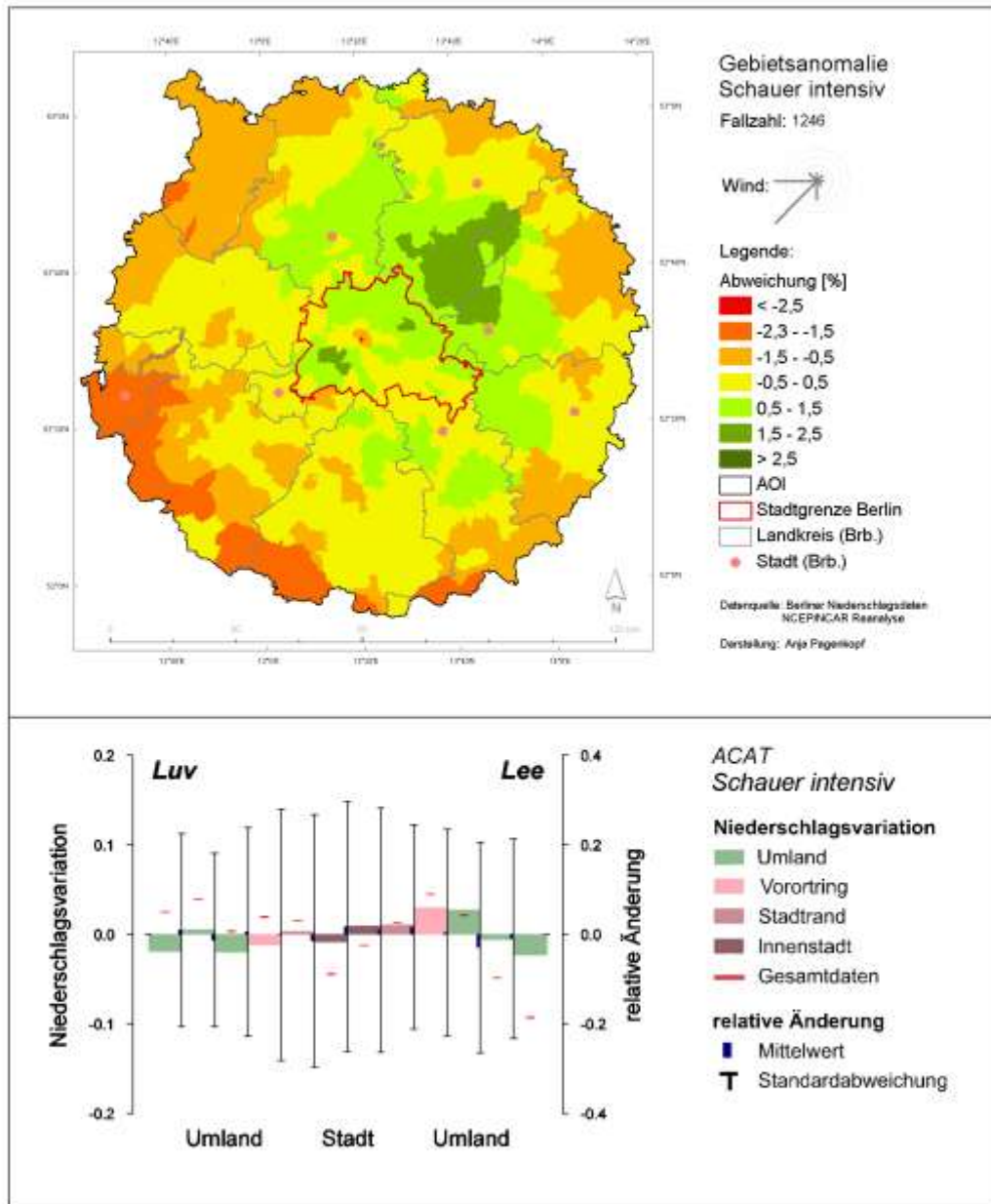
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

Name: **intensive Schauer**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 10 mm und 30 mm liegt

Fallzahl: 1246 mittlere Gesamtsumme: 6760 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 11 % mittlere Niederschlagshöhe: 5,4 mm



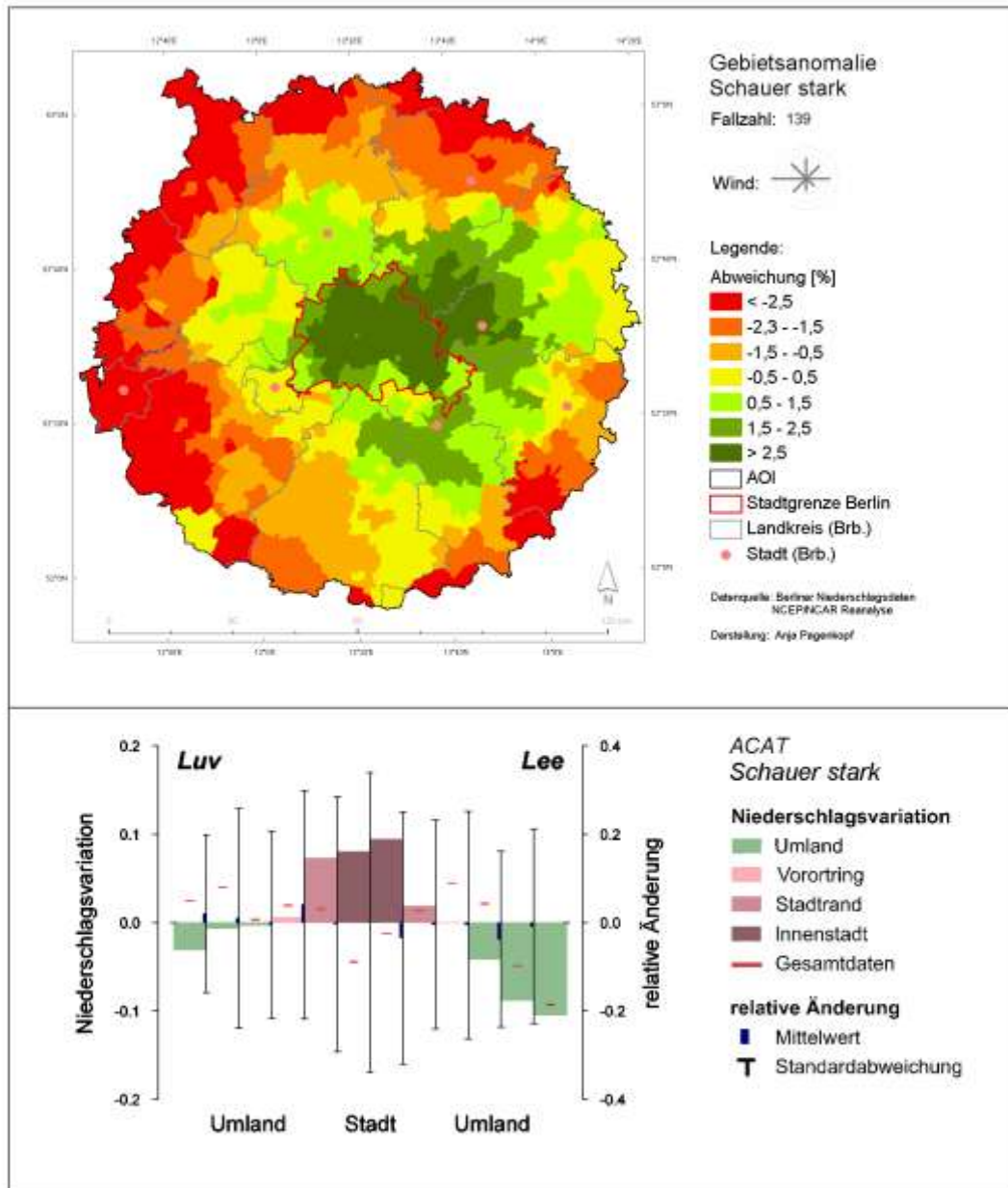
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

Name: **starke Schauer**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet über 30 mm liegt

Fallzahl: 139 mittlere Gesamtsumme: 1897 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 1,2 % mittlere Niederschlagshöhe: 12,2 mm



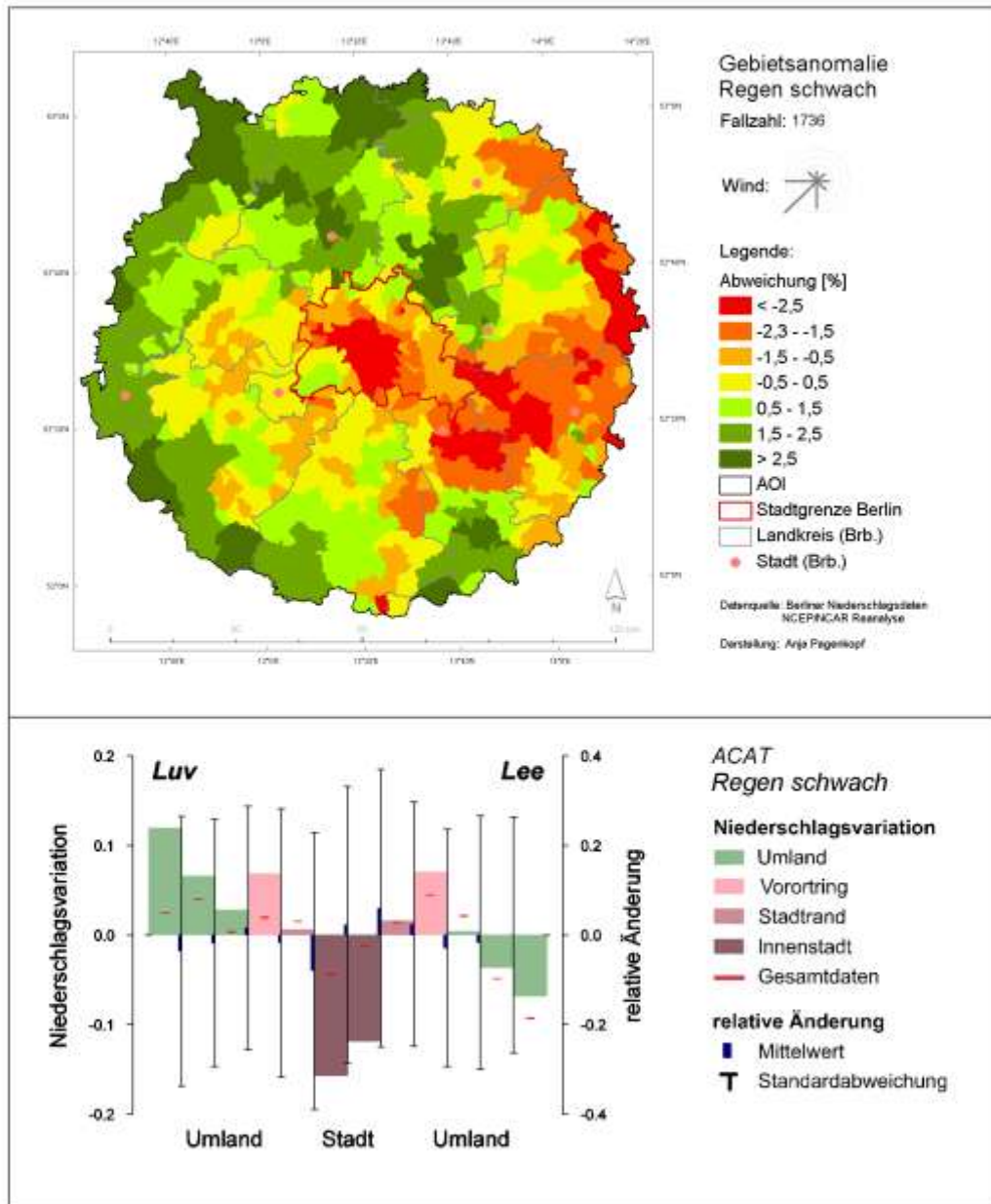
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

Name: **schwacher Regen**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen, Sprühregen oder Schnee an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet unter 1,5 mm liegt

Fallzahl: 1736 mittlere Gesamtsumme: 260 mm

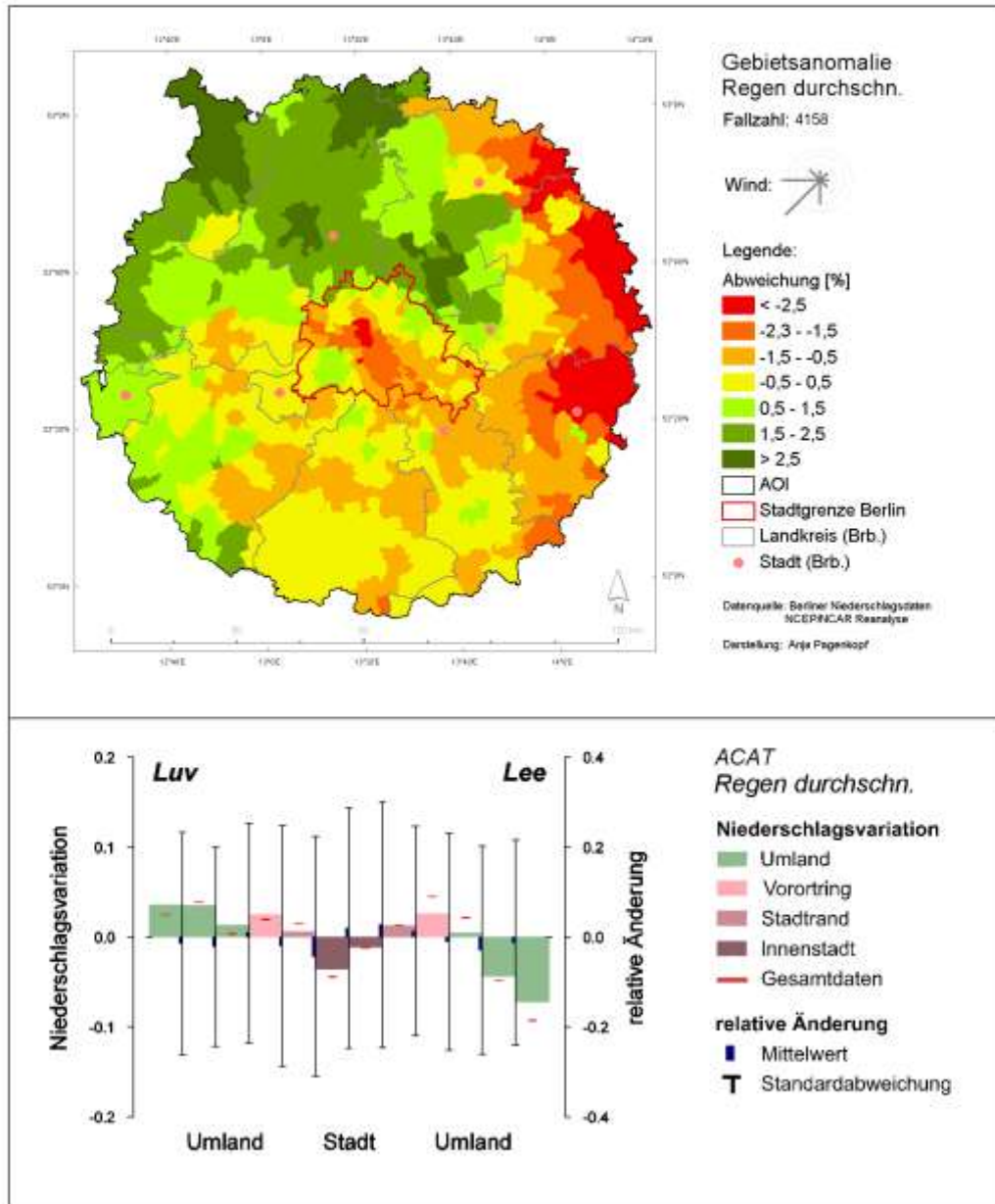
Anteil an allen Niederschlagstagen: 15 % mittlere Niederschlagshöhe: 0,1 mm



Name: **durchschnittlicher Regen**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen, Sprühregen oder Schnee an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 1,5 mm und 10 mm liegt

Fallzahl: 4158 mittlere Gesamtsumme: 6325 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 35 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,5 mm

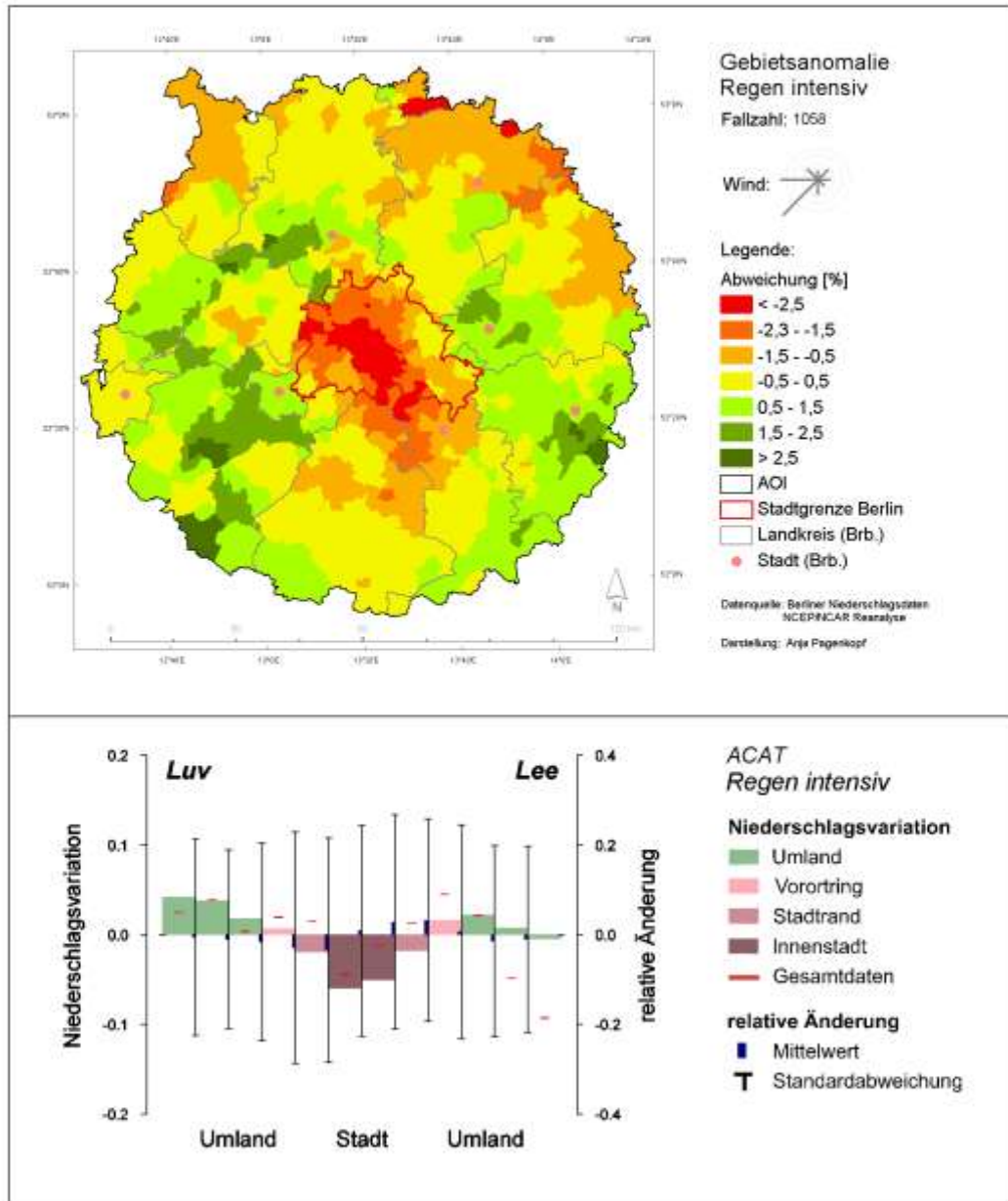


zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

Name: **intensiver Regen**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen, Sprühregen oder Schnee an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet zwischen 10 mm und 30 mm liegt

Fallzahl: 1058 mittlere Gesamtsumme: 6342 mm
Anteil an allen Niederschlagstagen: 8,9 % mittlere Niederschlagshöhe: 6,0 mm



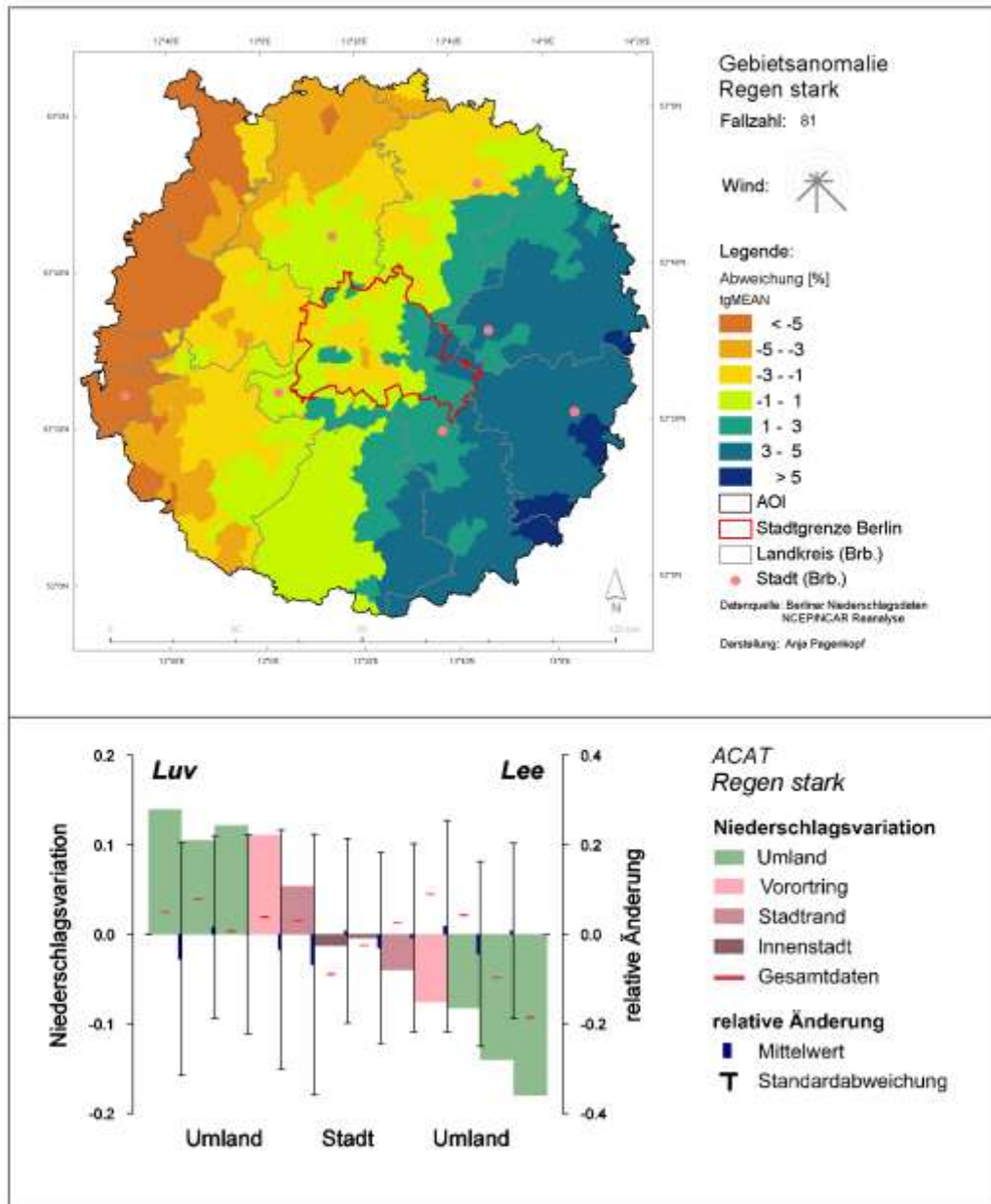
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Niederschlagsintensität

Name: **starker Regen**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen, Sprühregen oder Schnee an der Station Berlin-Tempelhof an denen das höchste Gebietsmittel im Untersuchungsgebiet über 30 mm liegt

Fallzahl: 81 mittlere Gesamtsumme: 1354 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 0,7 % mittlere Niederschlagshöhe: 16,7 mm



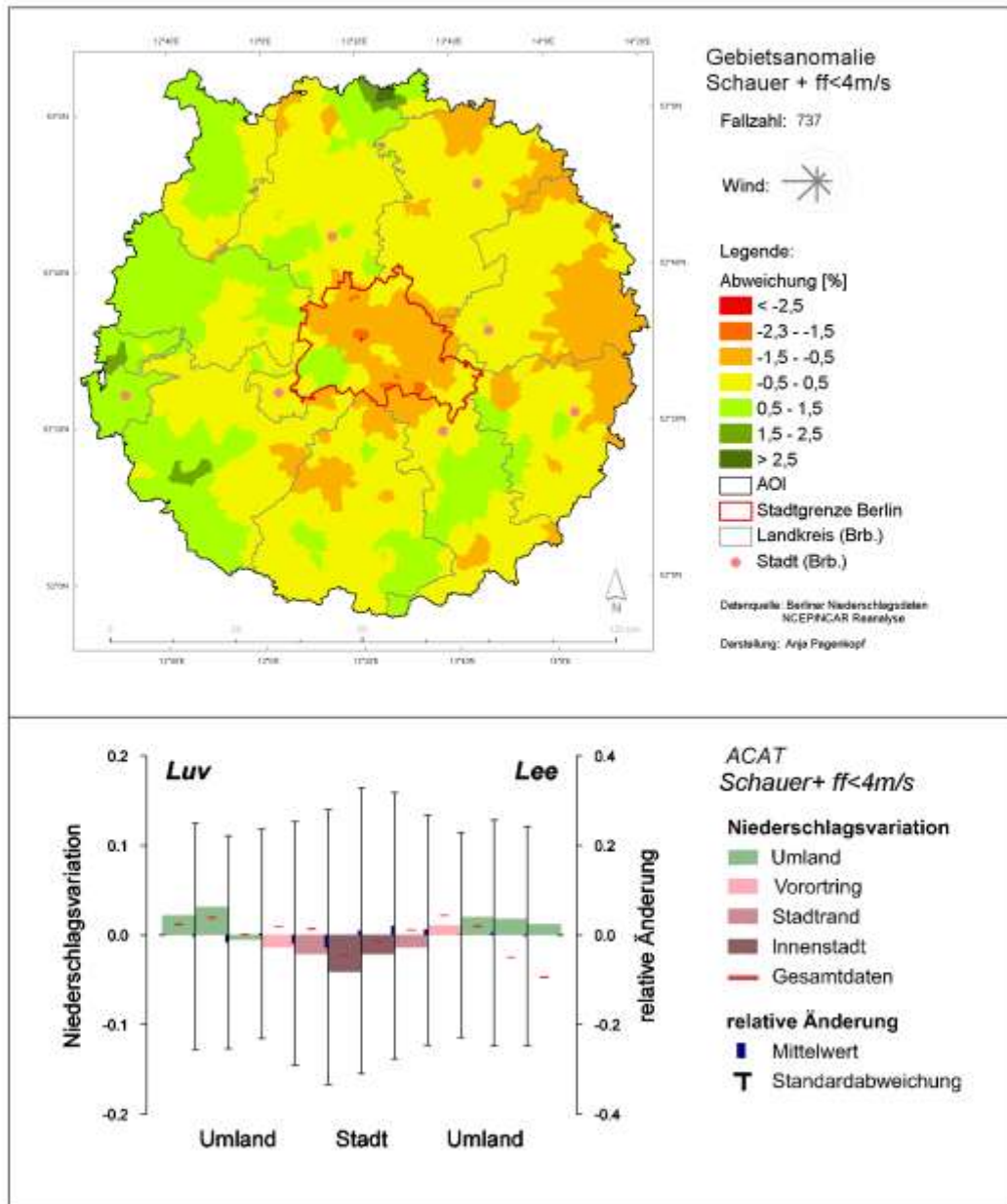
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

Name: Schauer bei geringen Windgeschwindigkeiten

Beschreibung: Tage mit Schauern beobachtet an der Station Berlin-Tempelhof und schwachem Wind

Fallzahl: 737 **mittlere Gesamtsumme:** 2714 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 6,2 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 3,7 mm



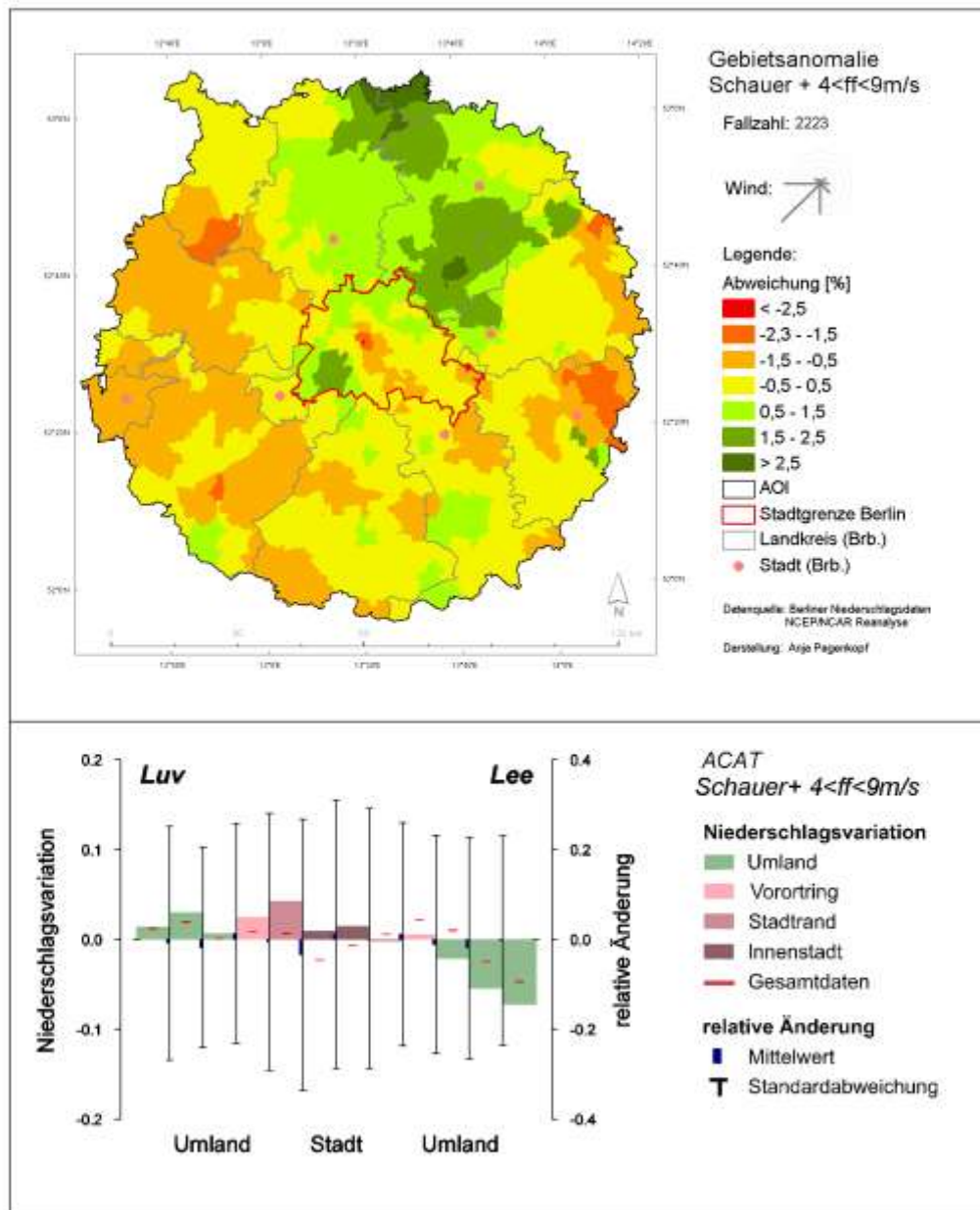
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

Name: Schauer bei mittlerer Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage mit Schauern beobachtet an der Station Berlin-Tempelhof und mittlerer Windgeschwindigkeit

Fallzahl: 2223 **mittlere Gesamtsumme:** 5860 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 19 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,6 mm



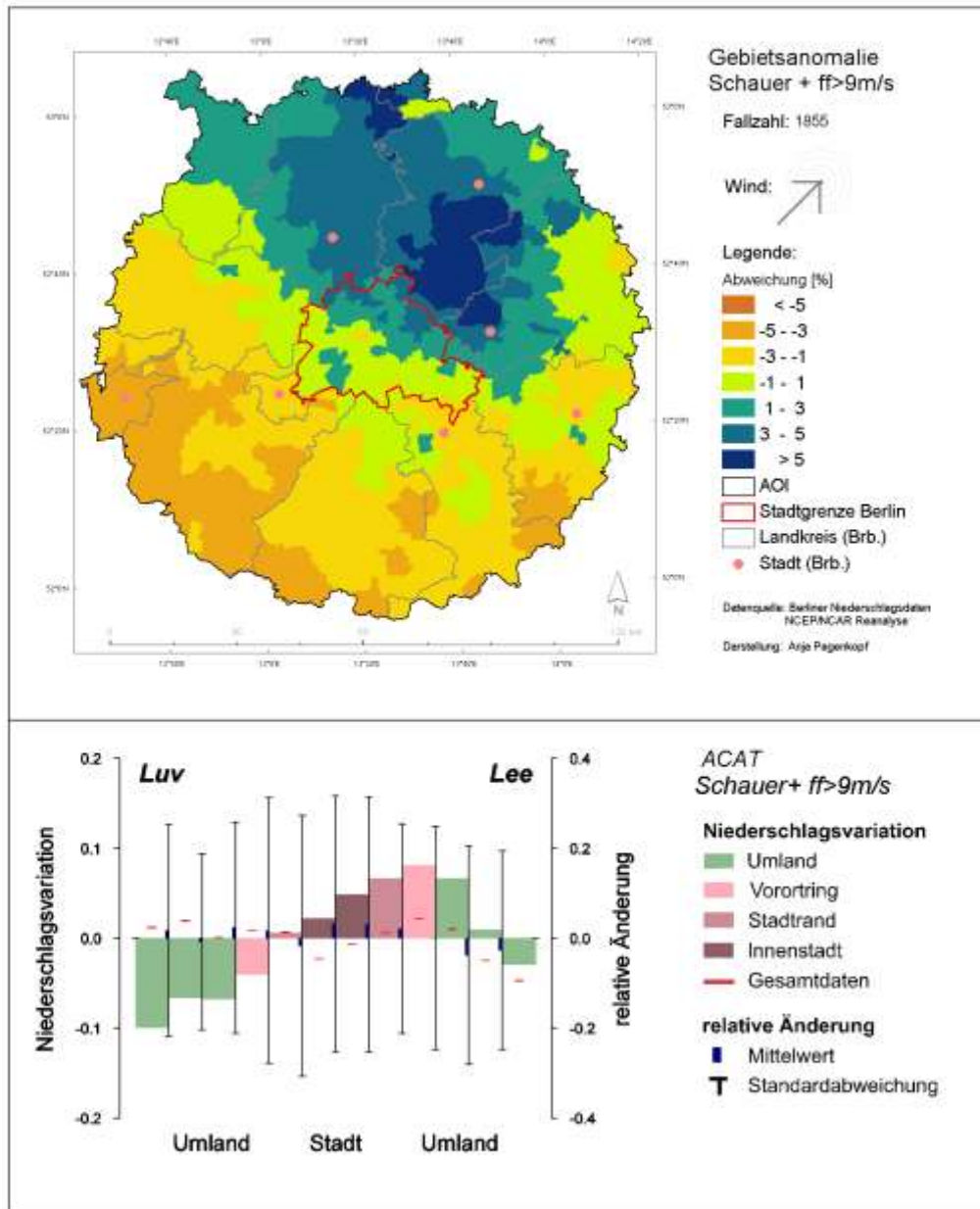
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

Name: Schauer bei starker Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage mit Schauern beobachtet an der Station Berlin-Tempelhof und starkem Wind

Fallzahl: 1855 **mittlere Gesamtsumme:** 4801 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 16 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,6 mm



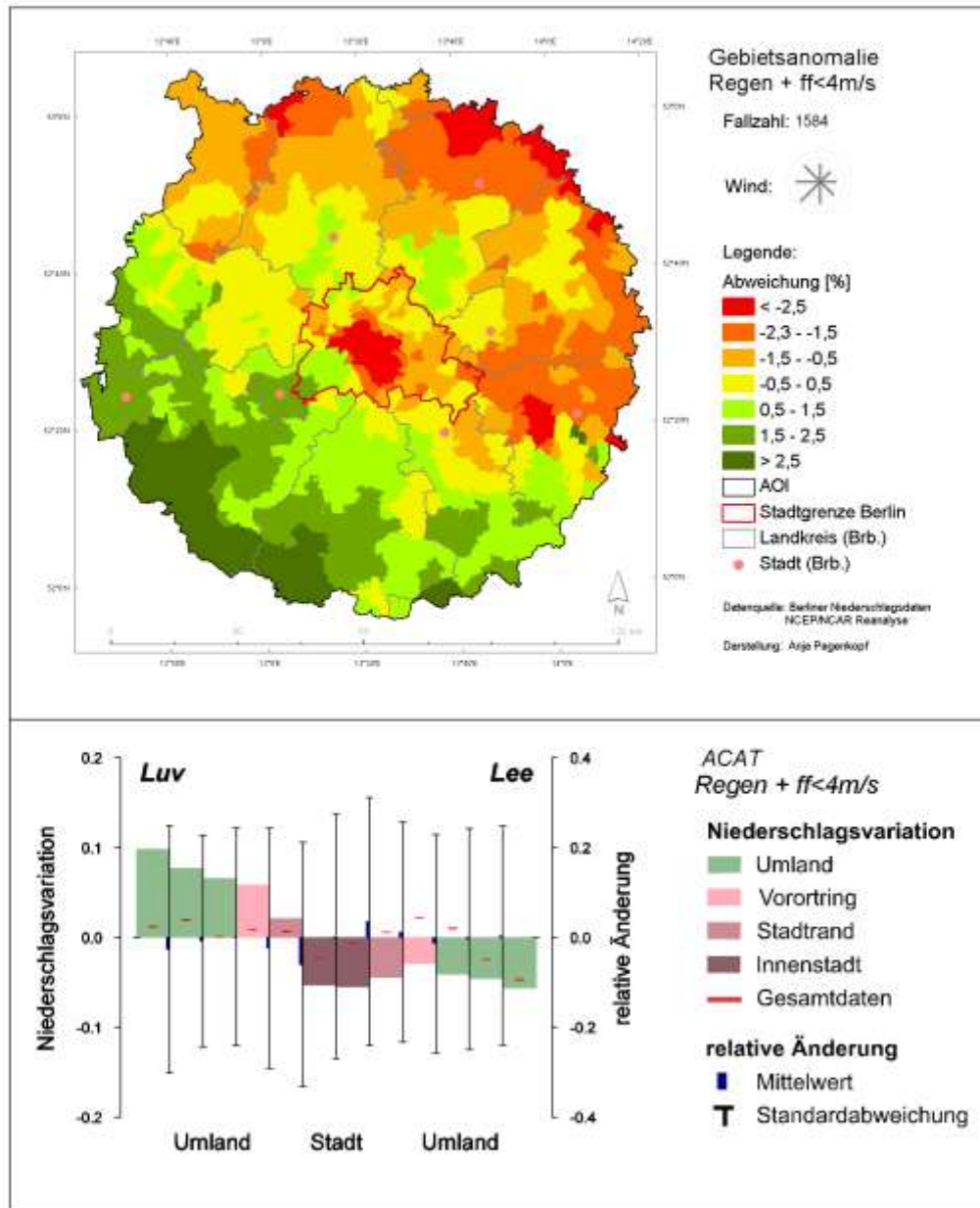
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

Name: Regen bei schwacher Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage mit Regen beobachtet an der Station Berlin-Tempelhof und schwachem Wind

Fallzahl: 1584 **mittlere Gesamtsumme:** 3340 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 13 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,1 mm



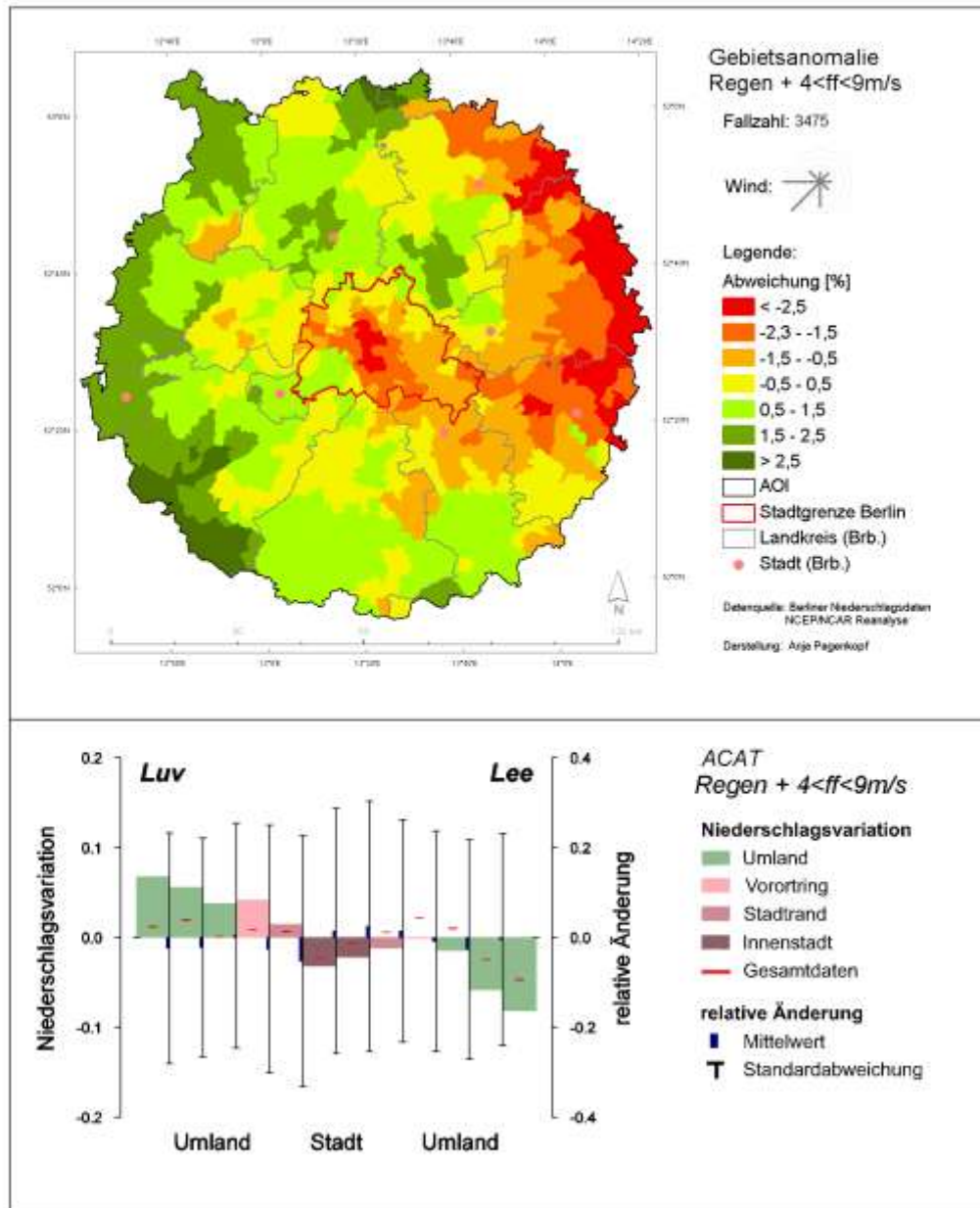
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

Name: Regen bei mittlerer Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage mit Regen beobachtet an der Station Berlin-Tempelhof und mittlerer Windgeschwindigkeit

Fallzahl: 3475 mittlere Gesamtsumme: 6415 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 29 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,8 mm



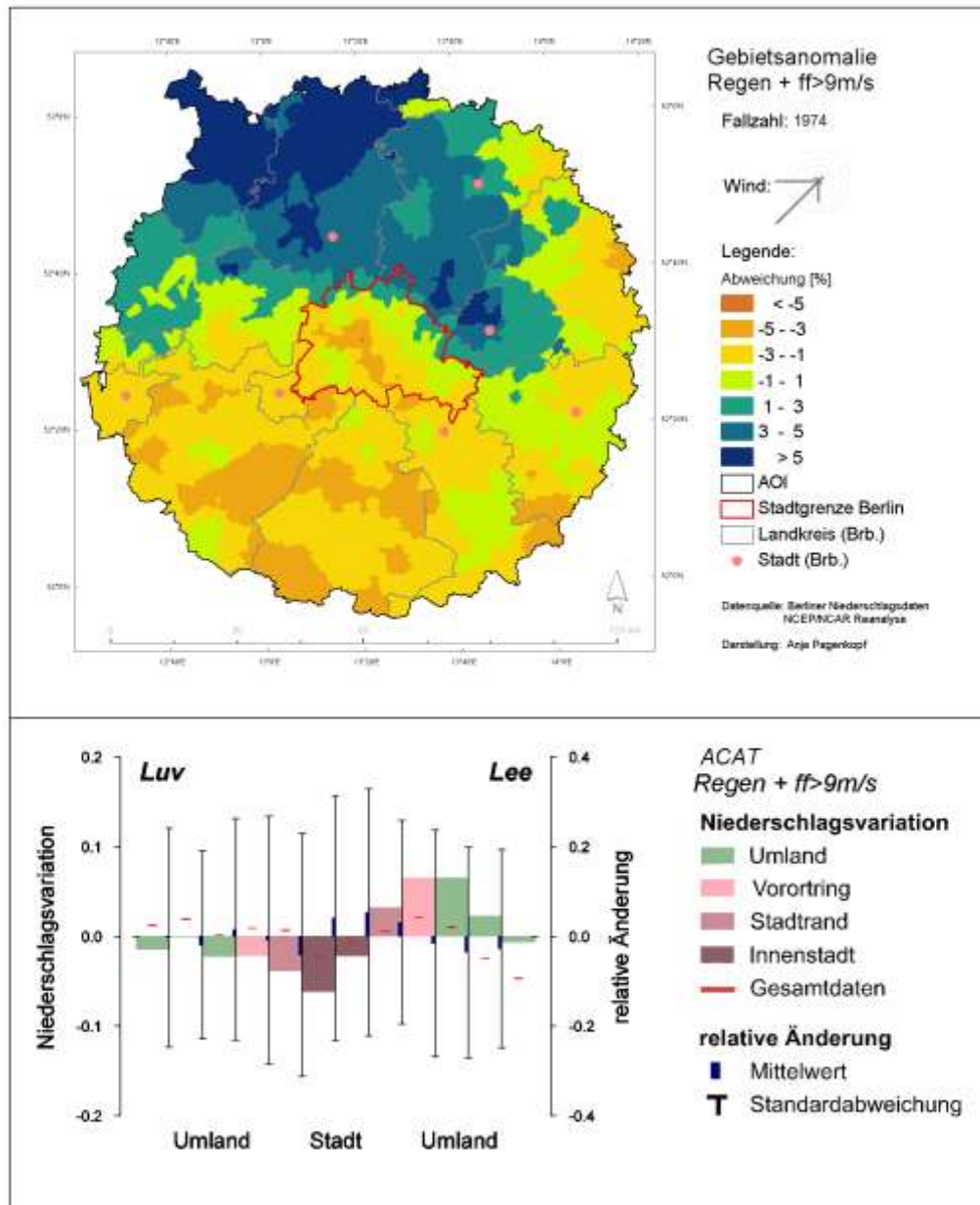
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Windgeschwindigkeit

Name: Regen bei starker Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage mit Regen beobachtet an der Station Berlin-Tempelhof und starkem Wind

Fallzahl: 1974 **mittlere Gesamtsumme:** 4525 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 17 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,3 mm



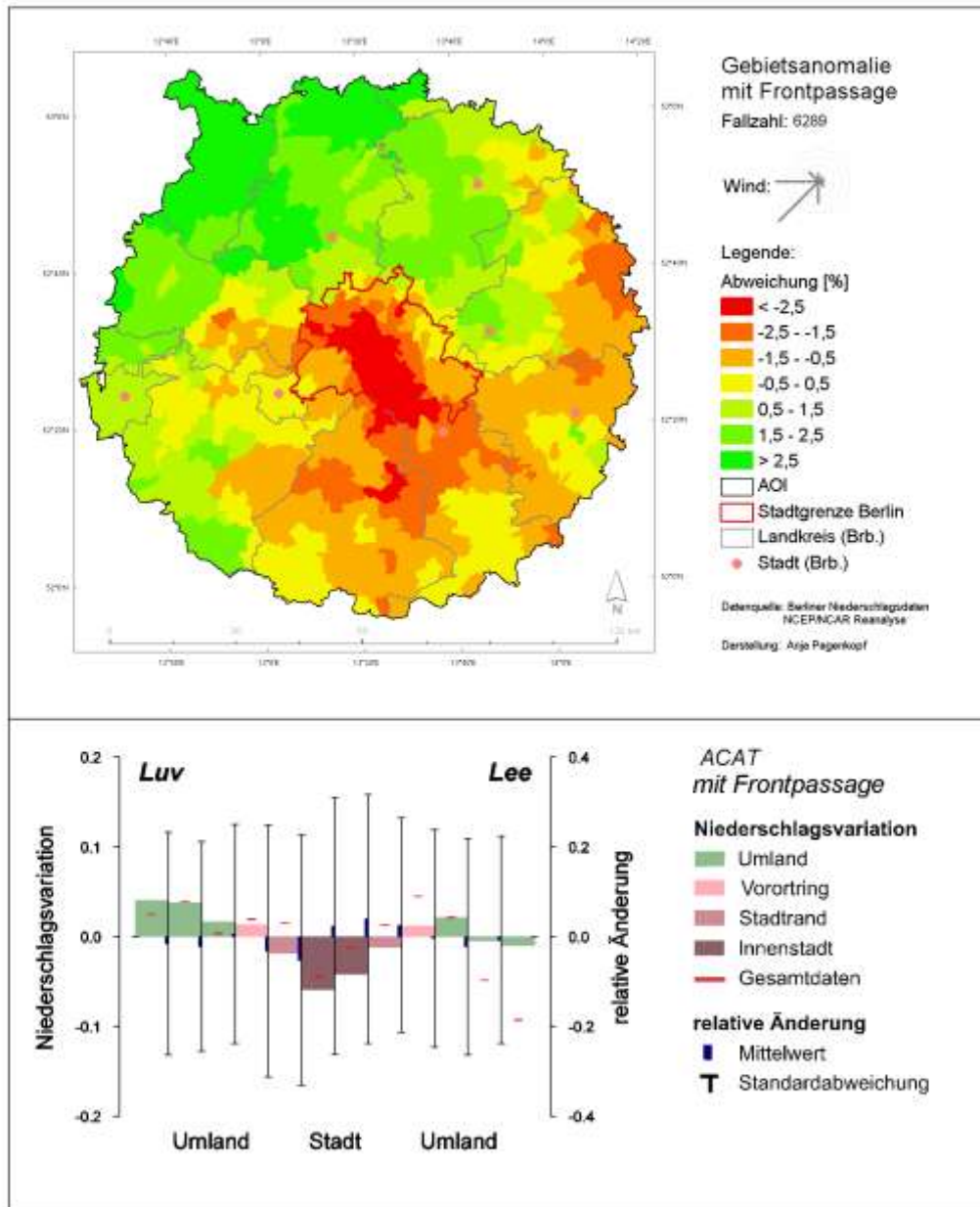
einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Name: **mit Frontpassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 6289 mittlere Gesamtsumme: 17568 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 53 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,8 mm



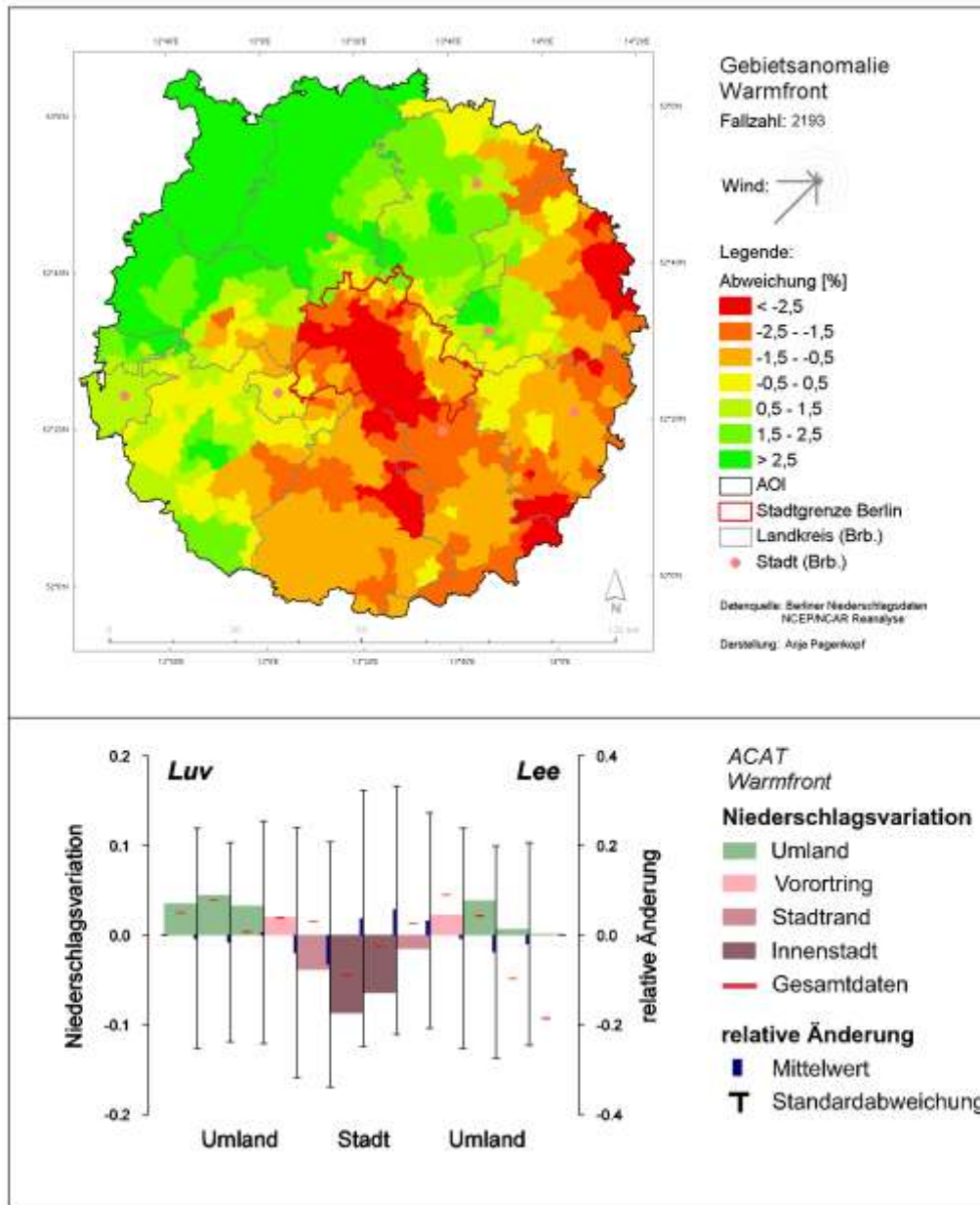
einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Name: **Warmfrontpassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Warmfrontpassage über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 2193 mittlere Gesamtsumme: 6350 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 18,5 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,9 mm



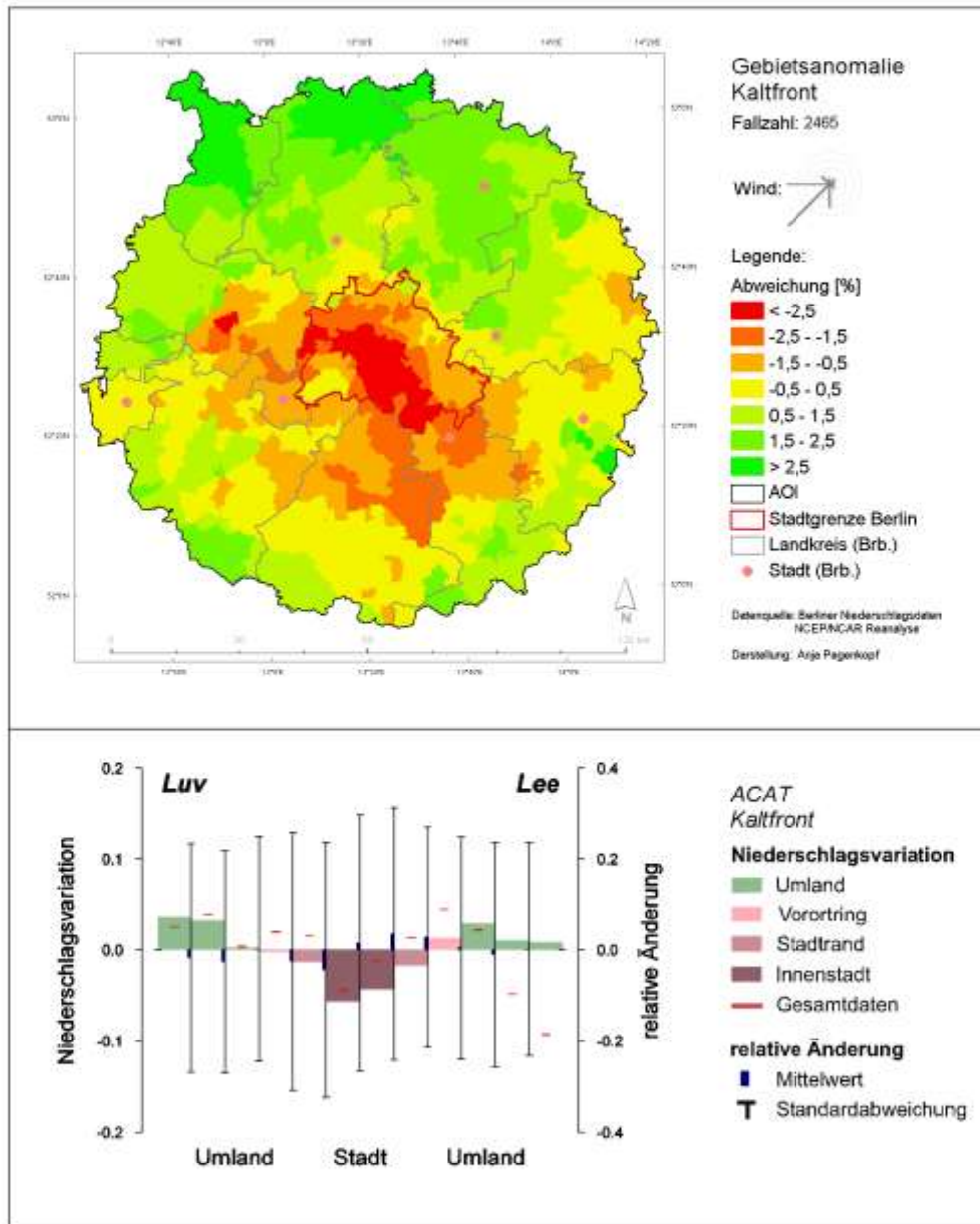
einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Name: **Kaltfrontpassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Kaltfrontpassage über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 2465 mittlere Gesamtsumme: 6490 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 20,8 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,6 mm



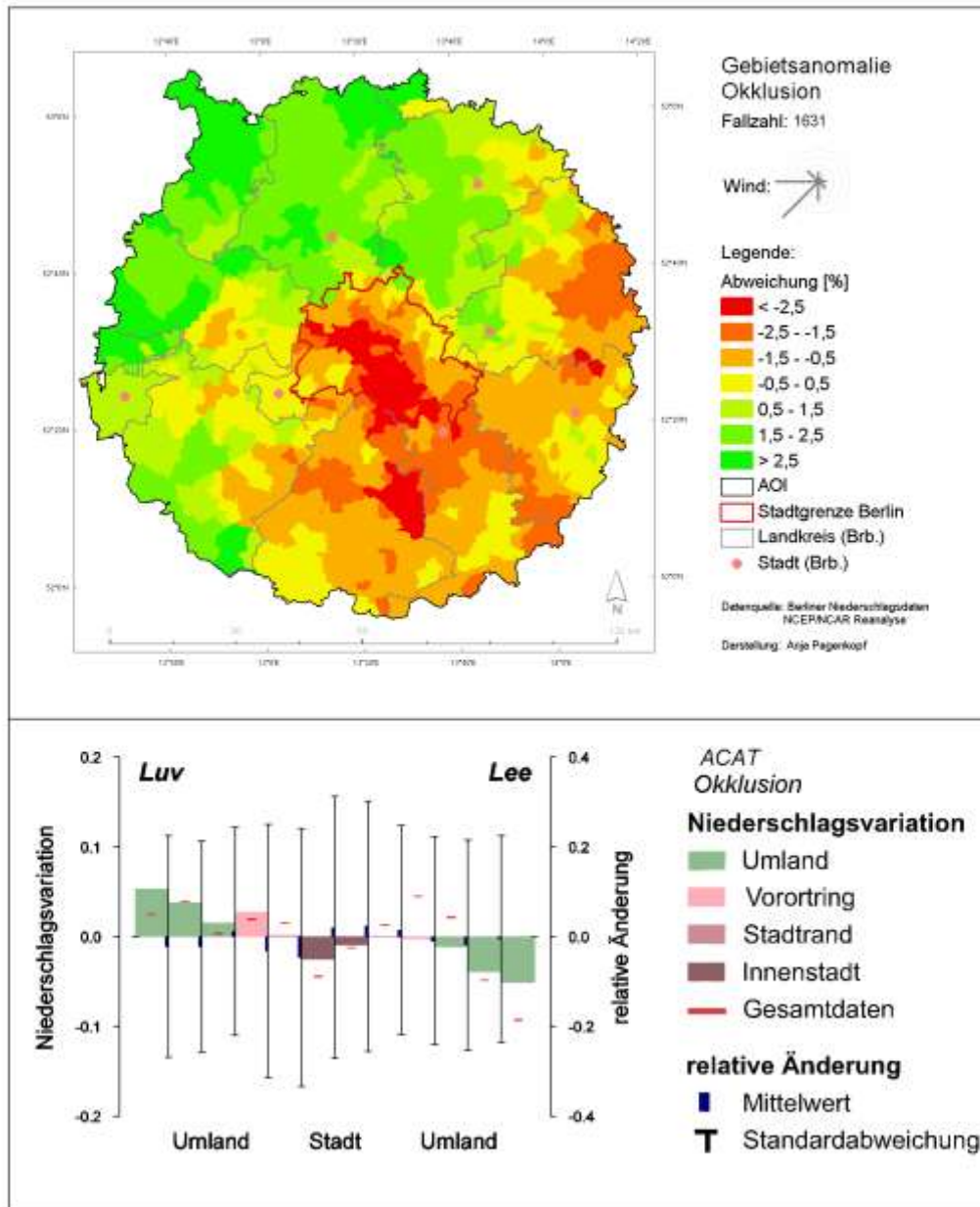
einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Name: **Okklusionspassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Okklusionspassage über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 1631 mittlere Gesamtsumme: 4728 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 14 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,9 mm



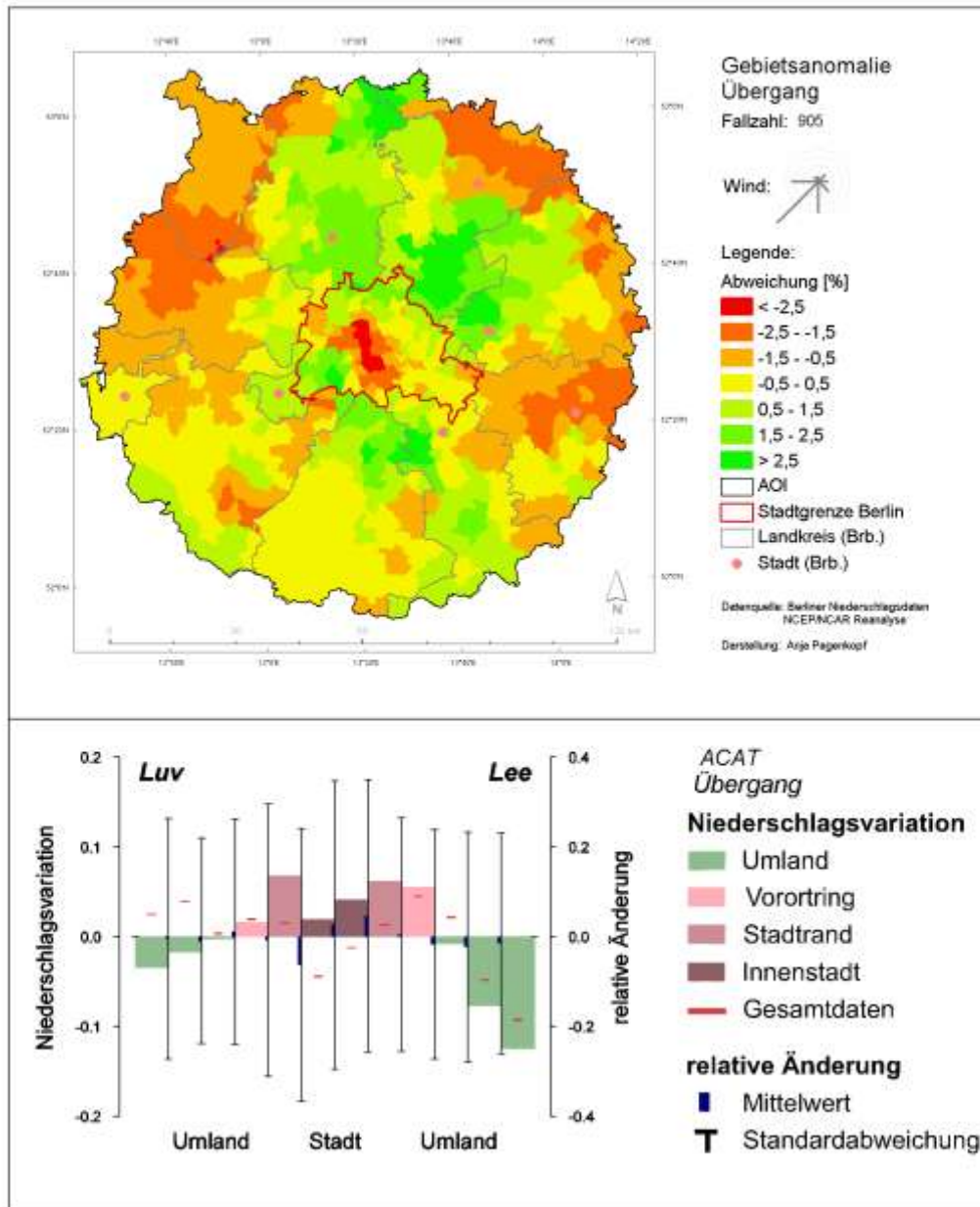
einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Name: **Luftmassenübergang**

Beschreibung: Tage für die am Meteorologischen Institut der FU Berlin ein Luftmassenübergang in Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 905 mittlere Gesamtsumme: 1087 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 7,6 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,2 mm



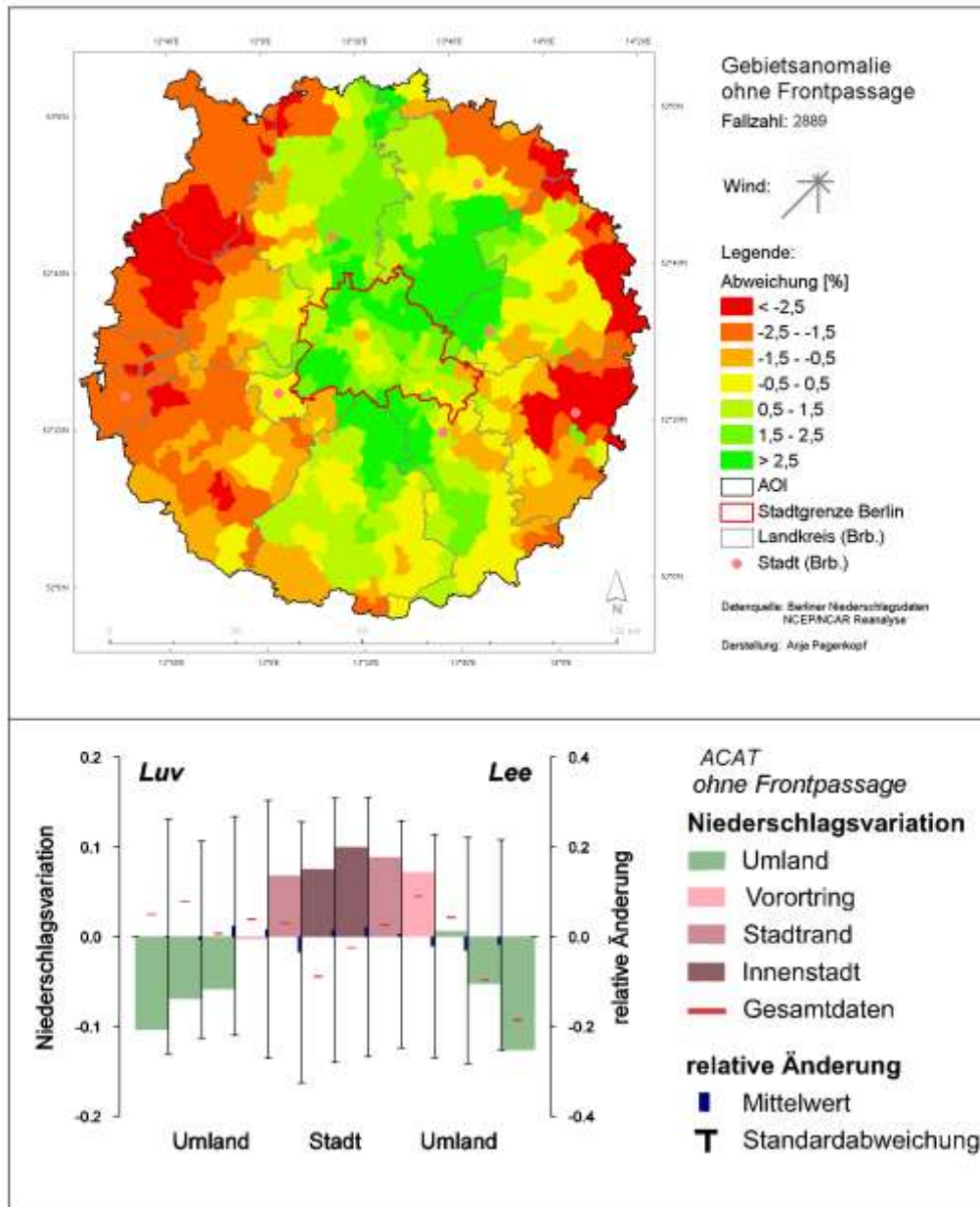
einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Name: **keine Frontpassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin keine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 3794 mittlere Gesamtsumme: 6113 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 32 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm



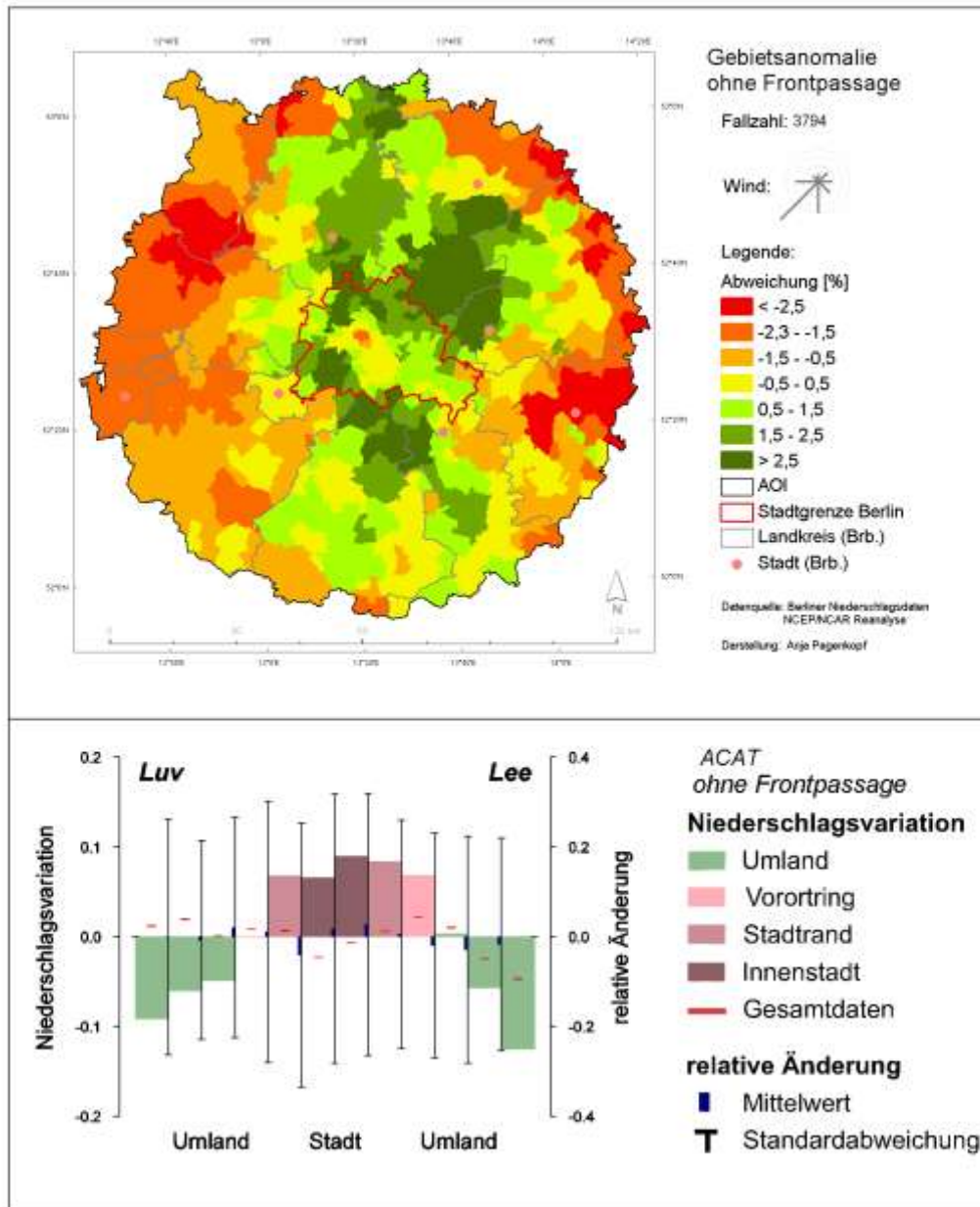
einfaktorielles Experiment: Frontpassage

Name: **ohne Frontpassage**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin keine Frontpassage oder Luftmassenübergang über Berlin ausgewiesen wurde

Fallzahl: 3794 mittlere Gesamtsumme: 6113 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 32 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm



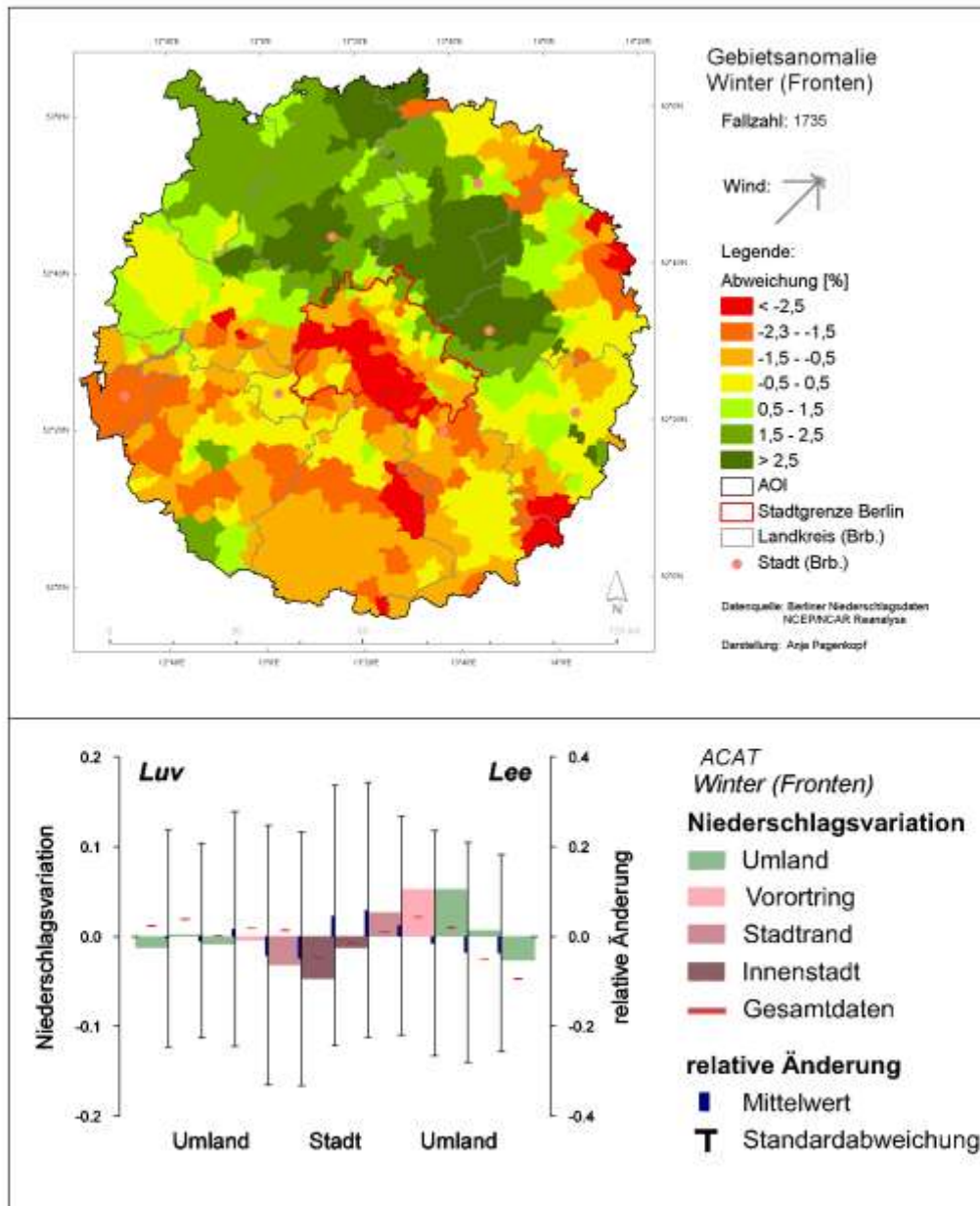
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Jahreszeit

Name: **mit Frontpassage im Winter**

Beschreibung: Tage mit Frontpassage im Winter (Dez, Jan, Feb)

Fallzahl: 1735 mittlere Gesamtsumme: 4253 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 15 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm



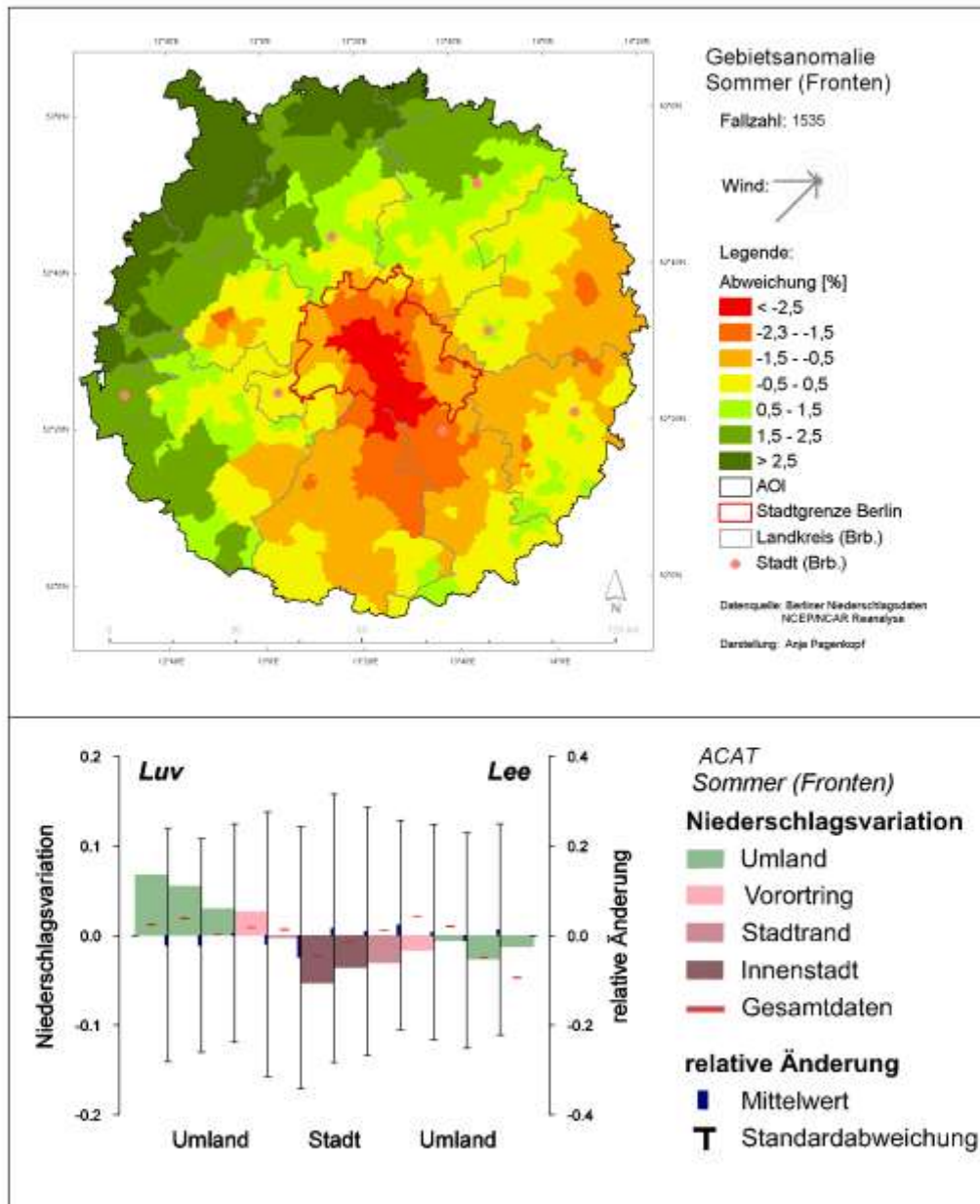
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Jahreszeit

Name: **mit Frontpassage im Sommer**

Beschreibung: Tage mit Frontpassage im Sommer (Juni, Juli, Aug)

Fallzahl: 1535 mittlere Gesamtsumme: 5494 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 13 % mittlere Niederschlagshöhe: 3,6 mm



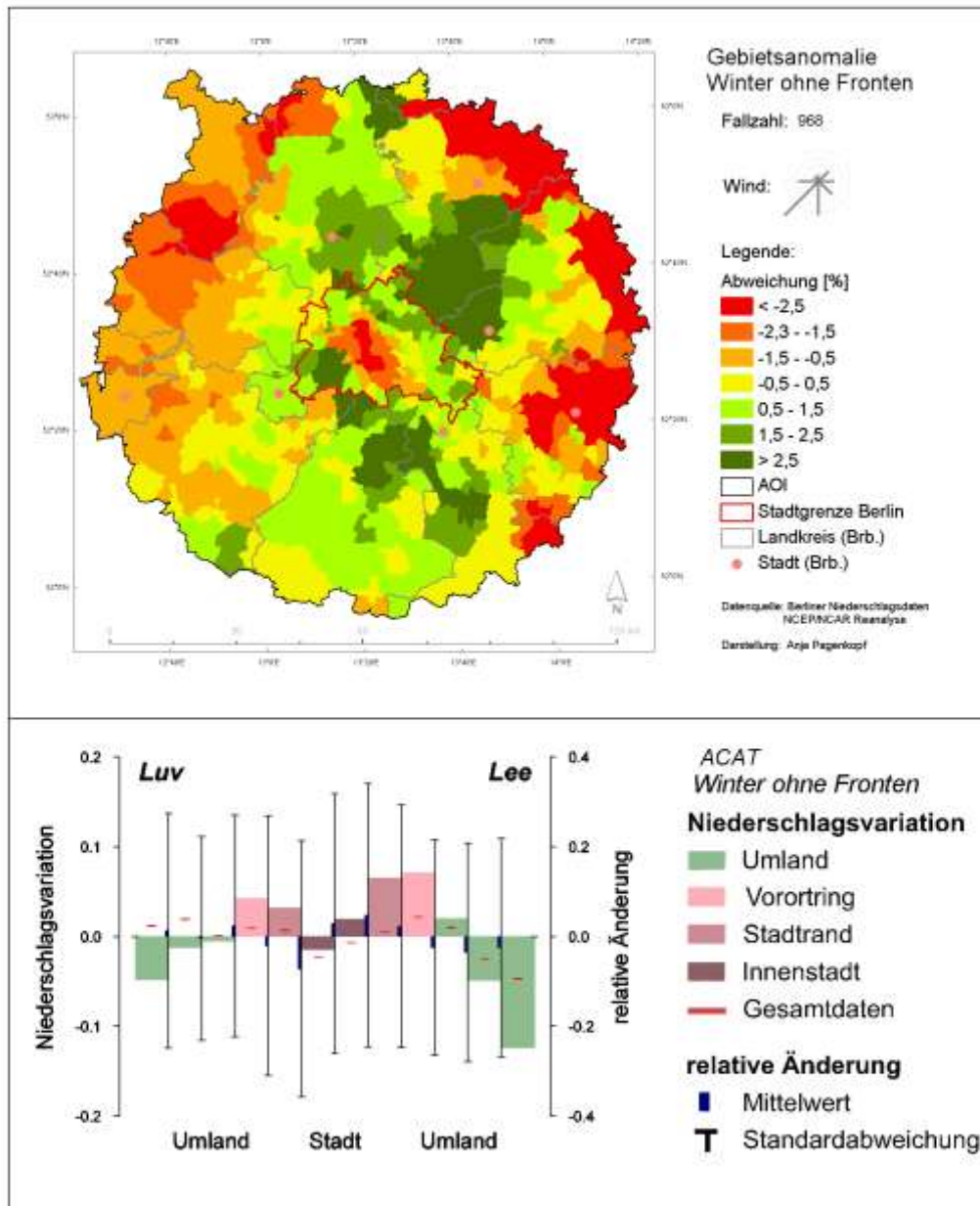
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Jahreszeit

Name: **ohne Frontdurchgang im Winter**

Beschreibung: Tage ohne Frontpassage im Winter (Dez, Jan, Feb)

Fallzahl: 968 mittlere Gesamtsumme: 1092 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 8,2 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,1 mm



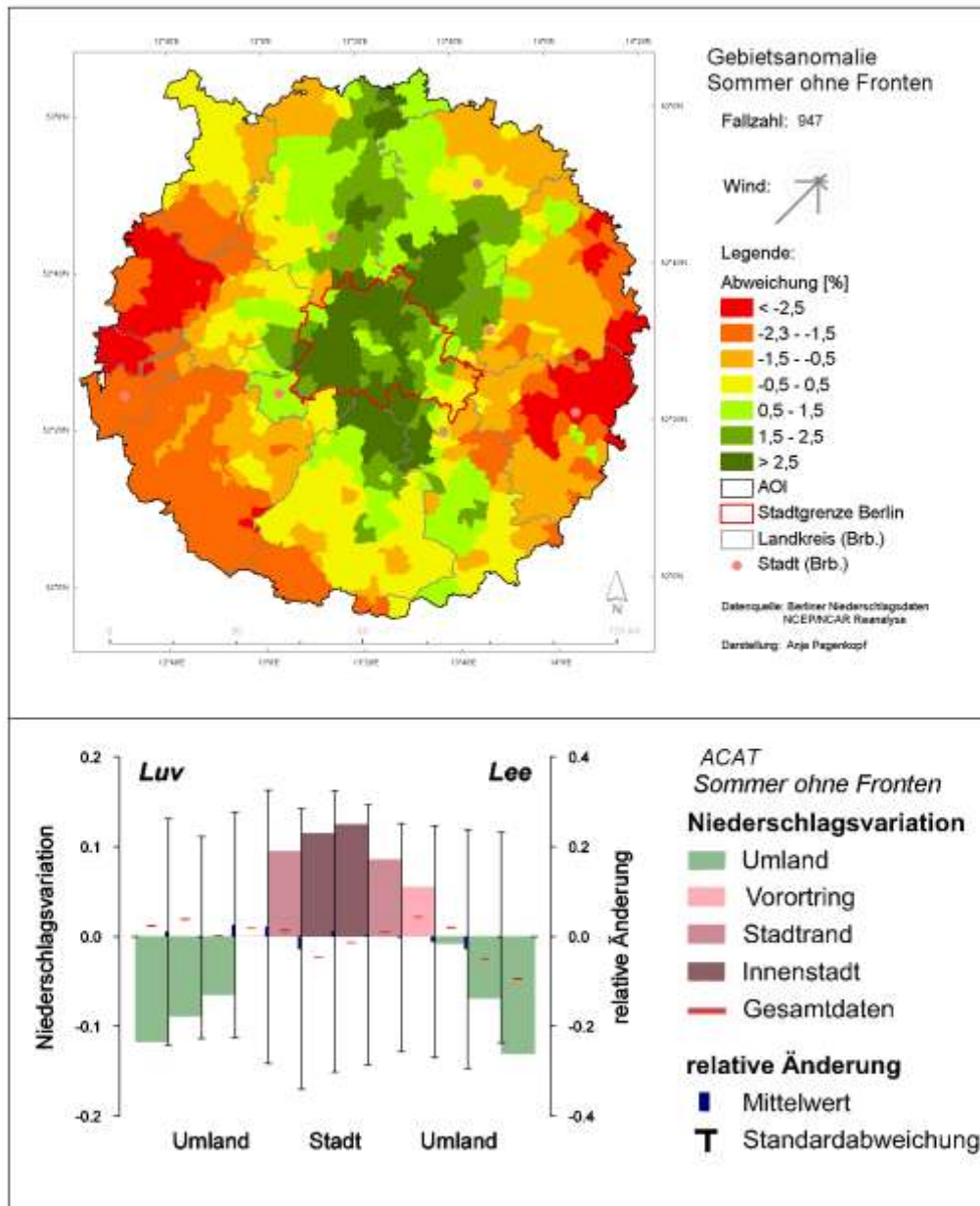
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Jahreszeit

Name: **ohne Frontpassage im Sommer**

Beschreibung: Tage ohne Frontpassage im Sommer (Juni, Juli, Aug)

Fallzahl: 947 mittlere Gesamtsumme: 2058 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 8,0 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,2 mm



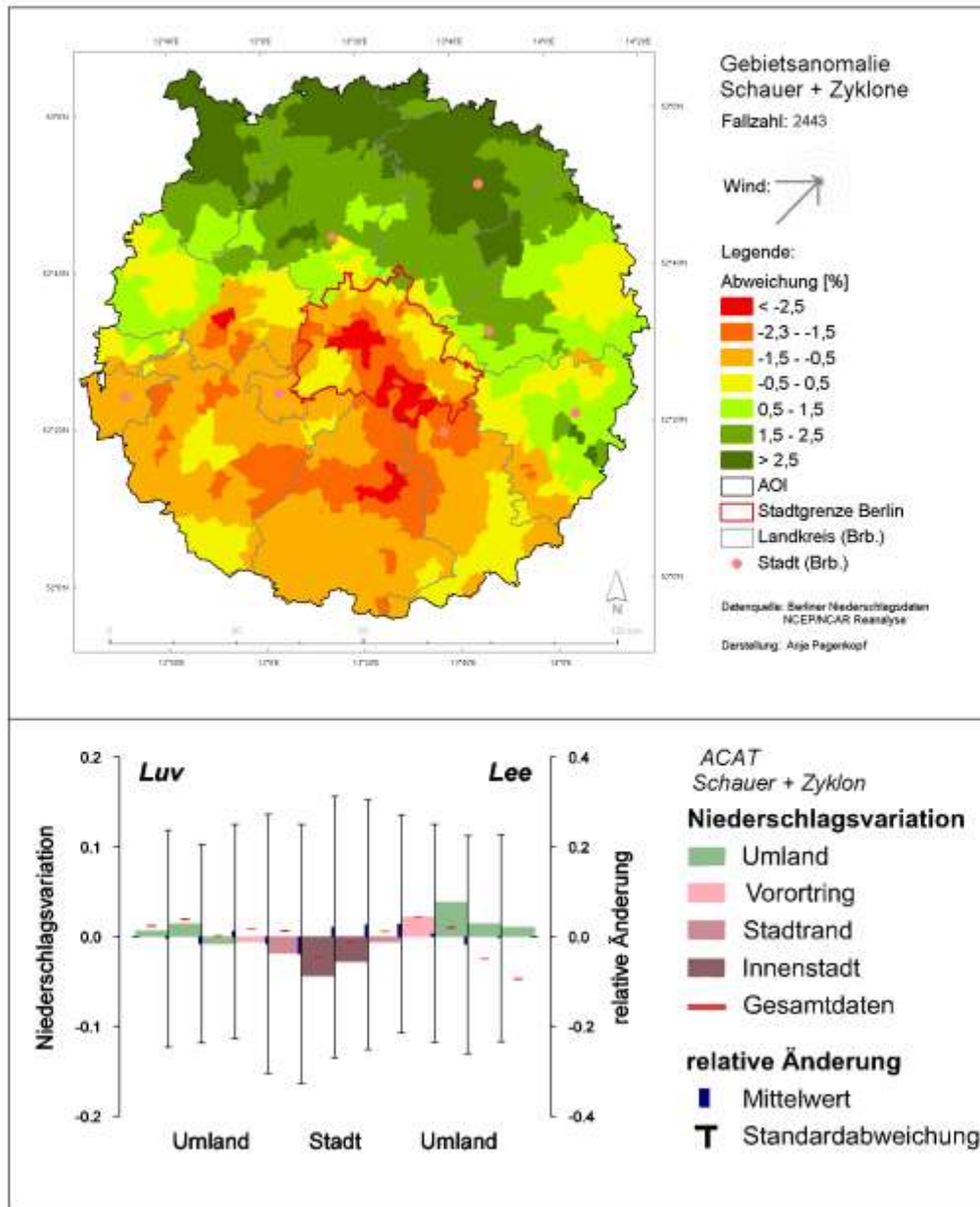
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Frontpassage

Name: Schauer bei Frontpassage (Zyklon)

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern in Berlin Tempelhof und Frontpassage über Berlin

Fallzahl: 2443 **mittlere Gesamtsumme:** 8215 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 21 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 3,4 mm



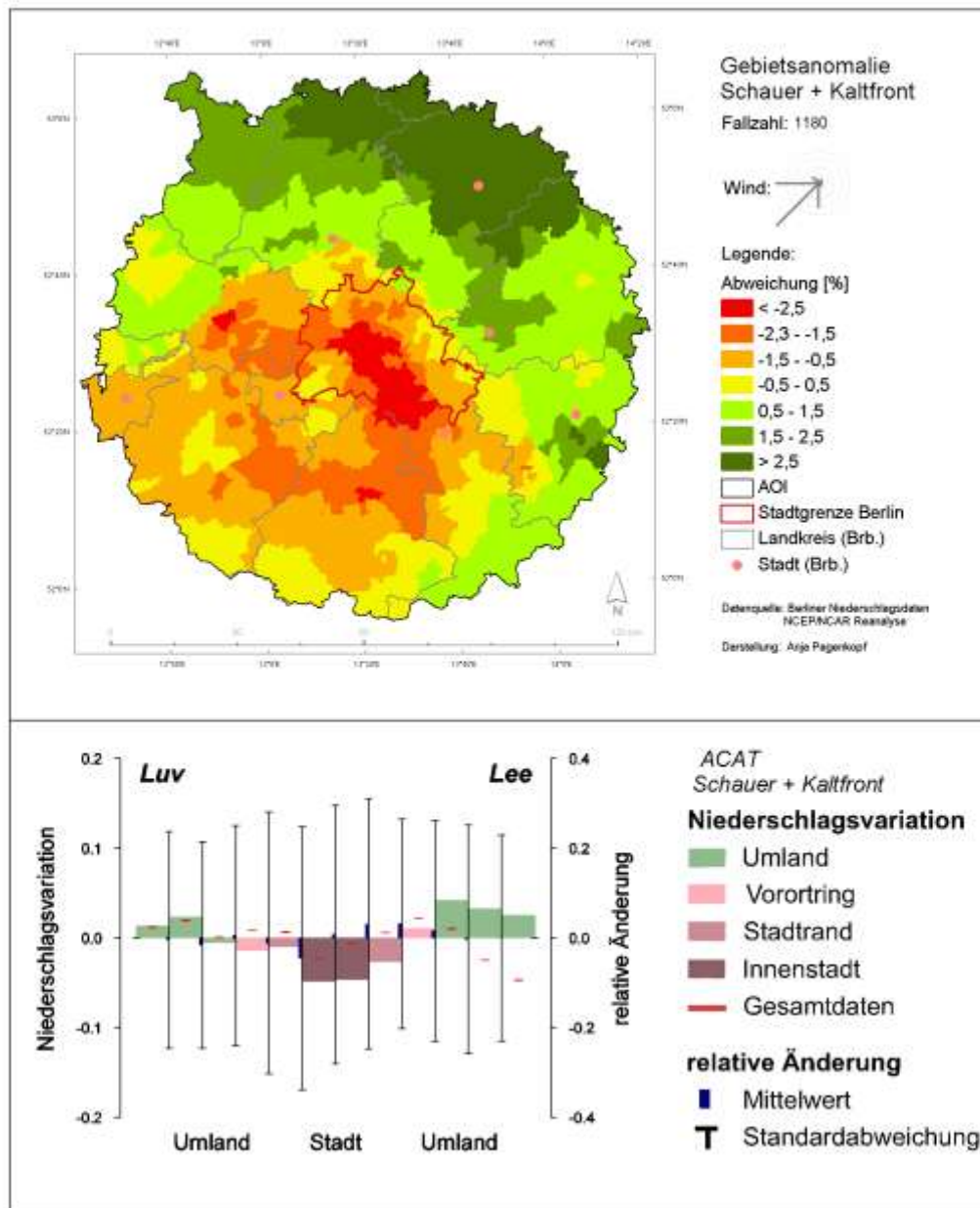
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Frontpassage

Name: Schauer bei Kaltfrontpassage

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern in Berlin Tempelhof und Kaltfrontpassage über Berlin

Fallzahl: 1180 **mittlere Gesamtsumme:** 3756 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 10 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 3,2 mm



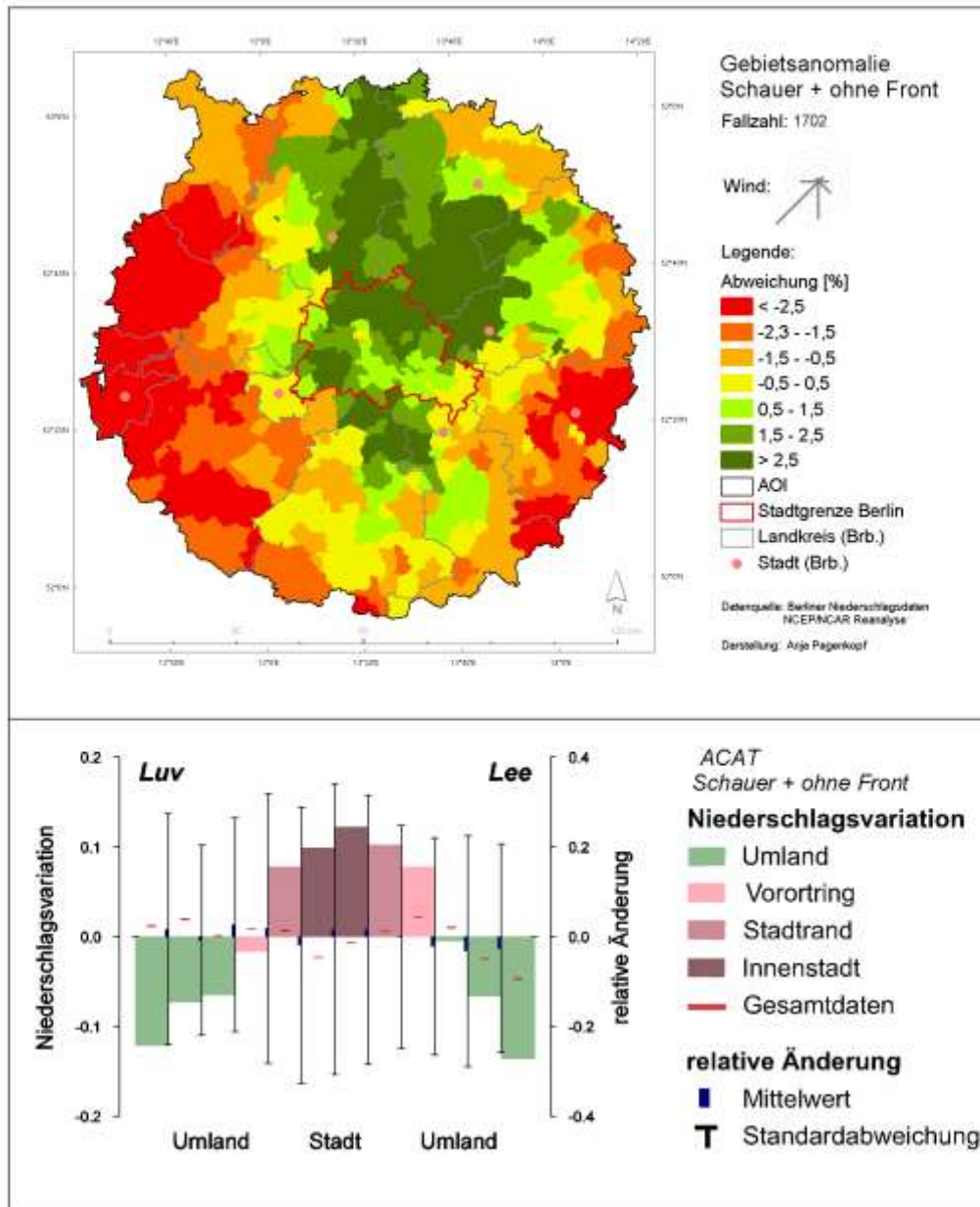
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Frontpassage

Name: Schauer ohne Frontpassage

Beschreibung: Tage mit beobachteten Schauern in Berlin Tempelhof und ohne Frontpassage über Berlin

Fallzahl: 1702 **mittlere Gesamtsumme:** 3254 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 14 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 1,9 mm



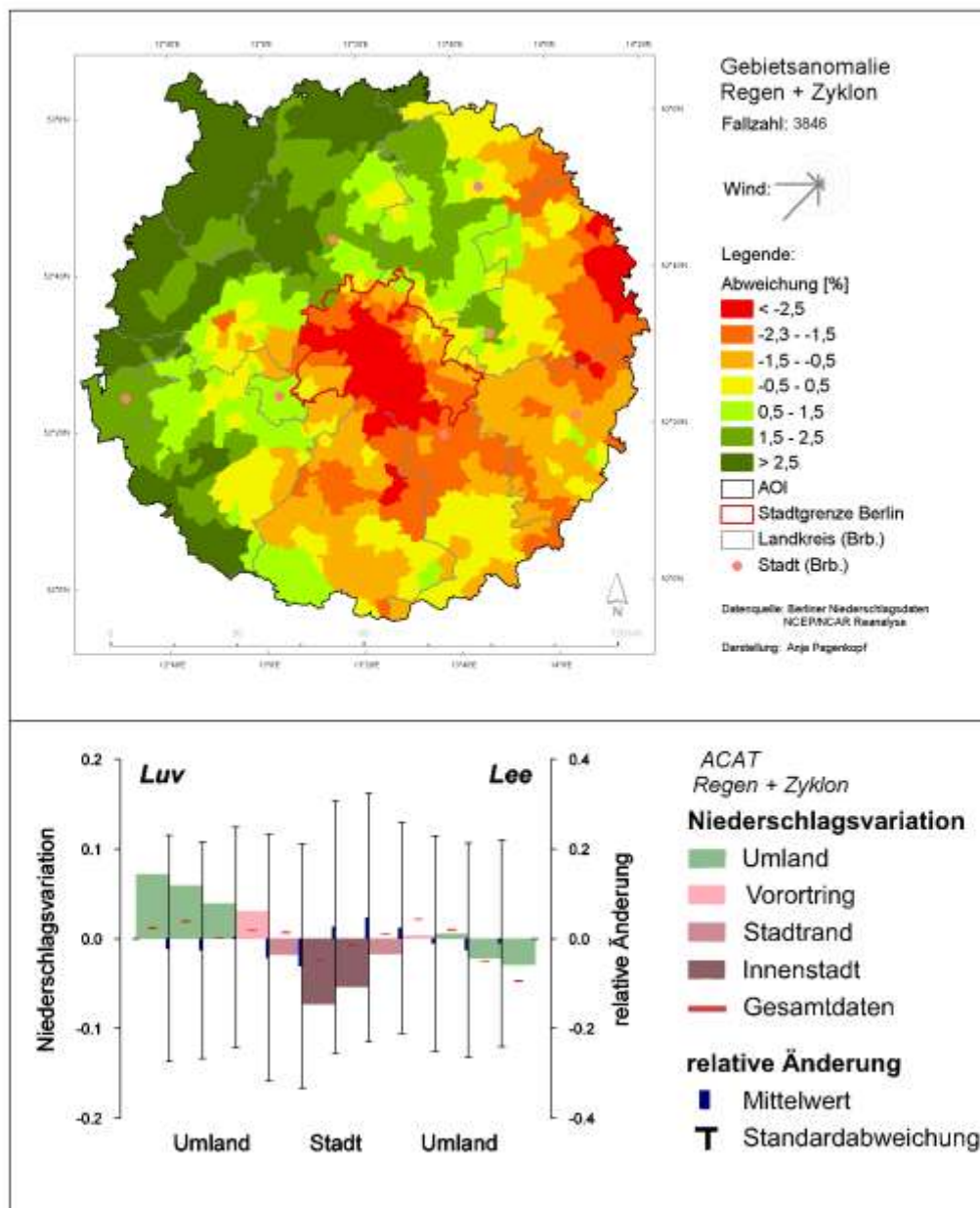
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Frontpassage

Name: **Regen mit Frontpassage**

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen in Berlin Tempelhof und Frontpassage über Berlin

Fallzahl: 3846 mittlere Gesamtsumme: 9353 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 32 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm



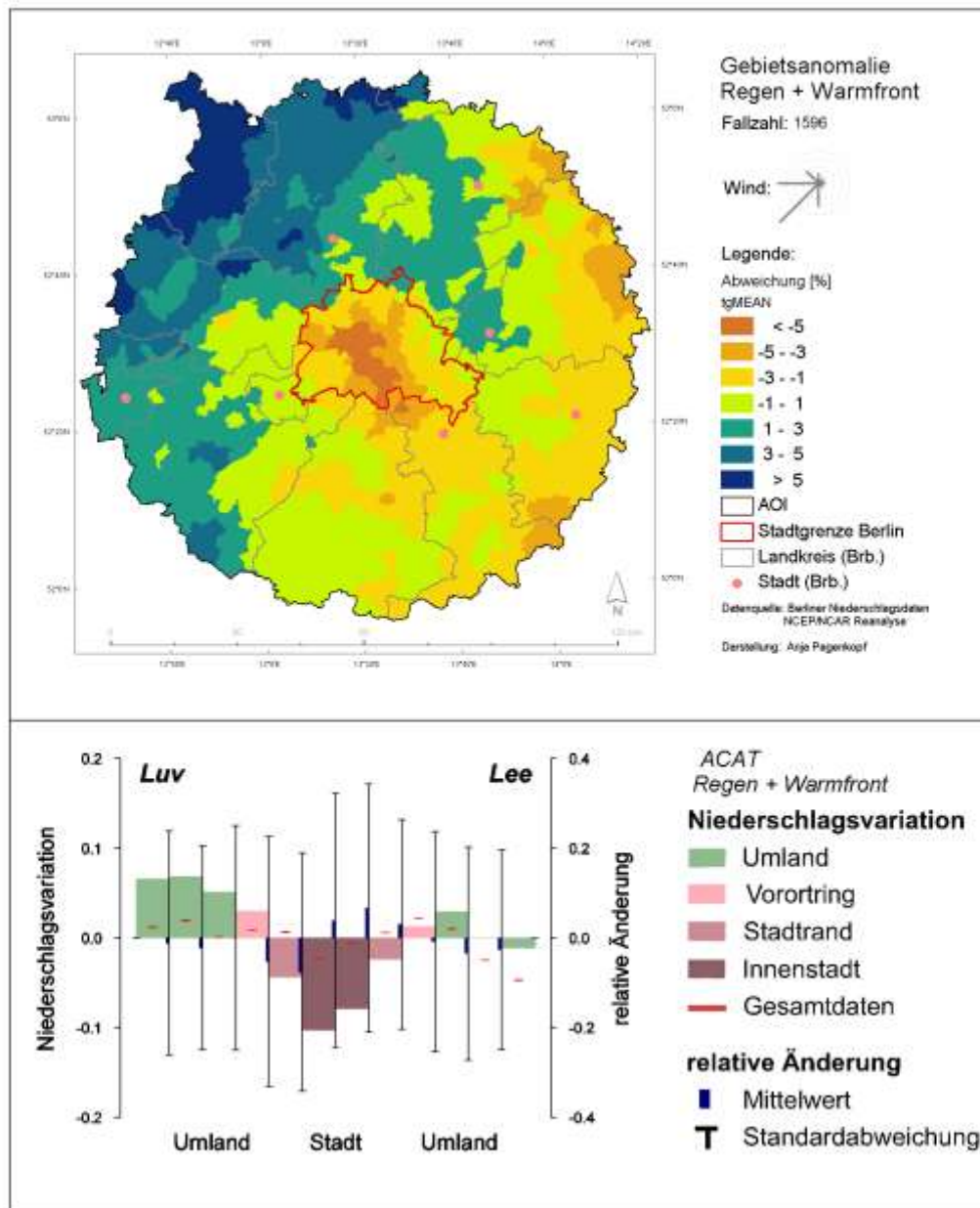
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Frontpassage

Name: Regen bei Warmfrontpassage

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen in Berlin Tempelhof und Warmfrontpassage über Berlin

Fallzahl: 1596 **mittlere Gesamtsumme:** 4189 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 13 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,6 mm



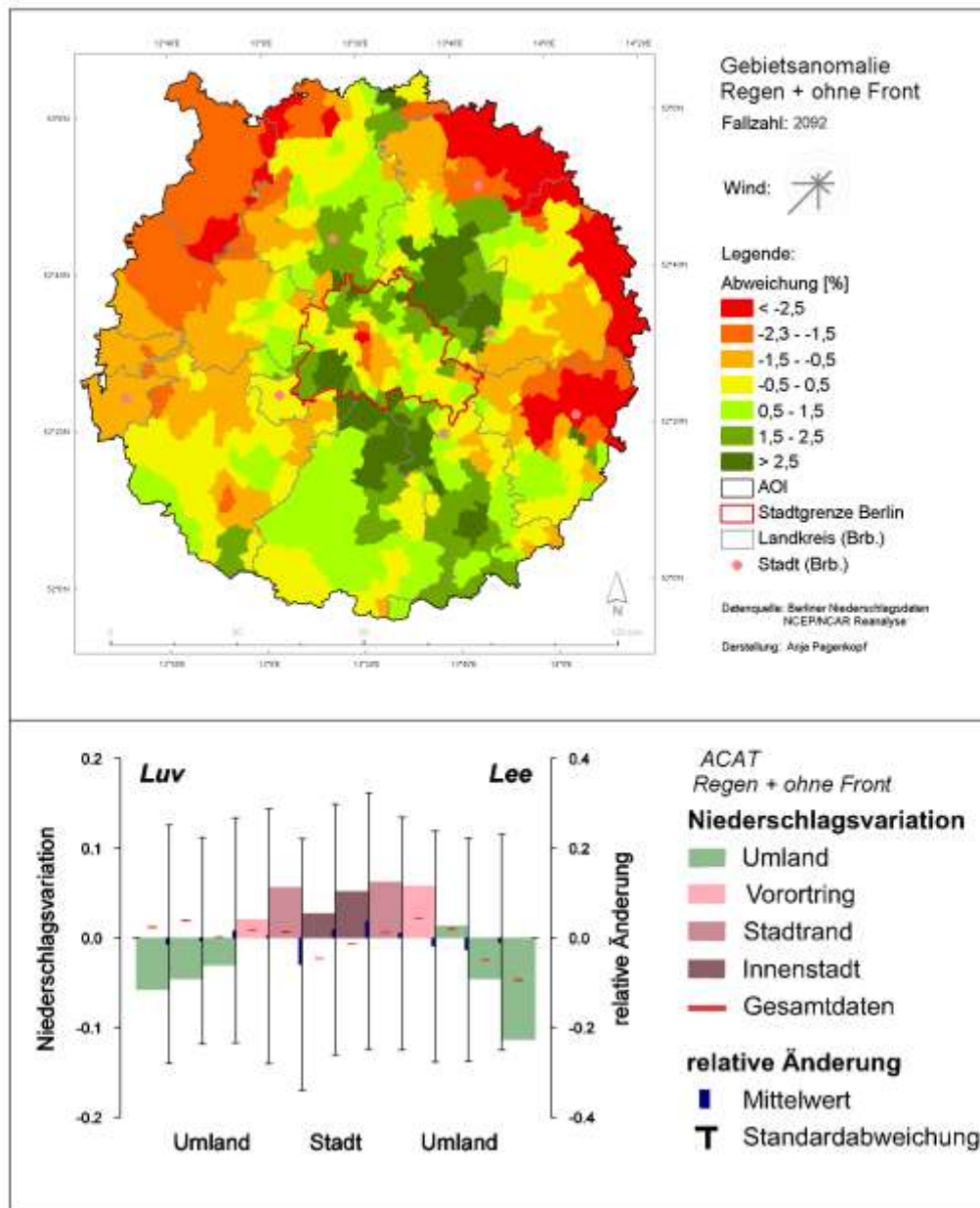
zweifaktorielles Experiment: Niederschlagstyp, Frontpassage

Name: Regen ohne Frontpassage

Beschreibung: Tage mit beobachteten Regen in Berlin Tempelhof und ohne Frontpassage über Berlin

Fallzahl: 2092 **mittlere Gesamtsumme:** 2859 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 18 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 1,4 mm



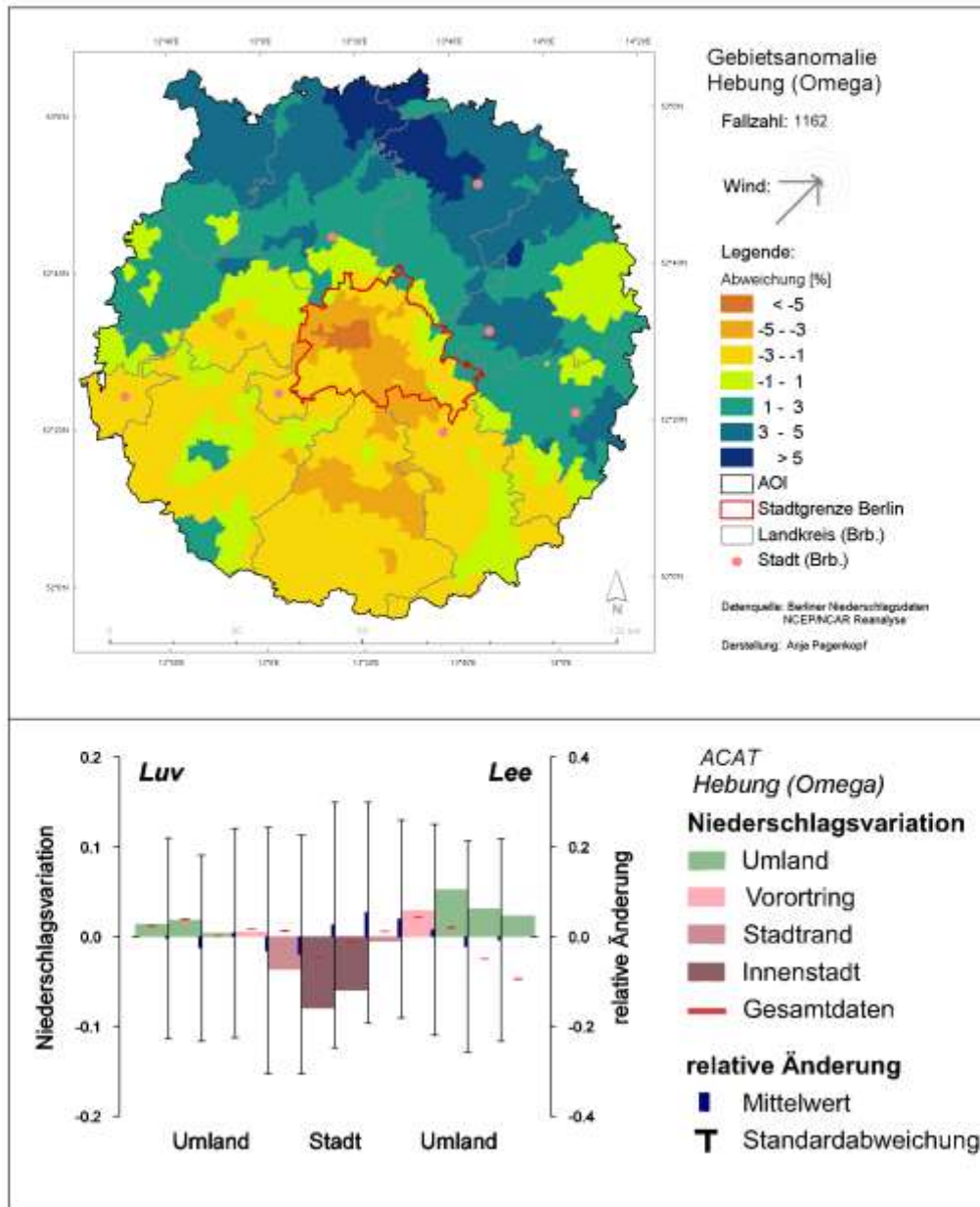
einfaktorielles Experiment: Vertikalbewegung

Name: **sehr stark Hebung (Omega)**

Beschreibung: Tage mit großräumiger Hebung (10 Perzentil der Omegawerte aus NCEP-NCAR)

Fallzahl: 1162 mittlere Gesamtsumme: 5783 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 9,8 % mittlere Niederschlagshöhe: 5,0 mm



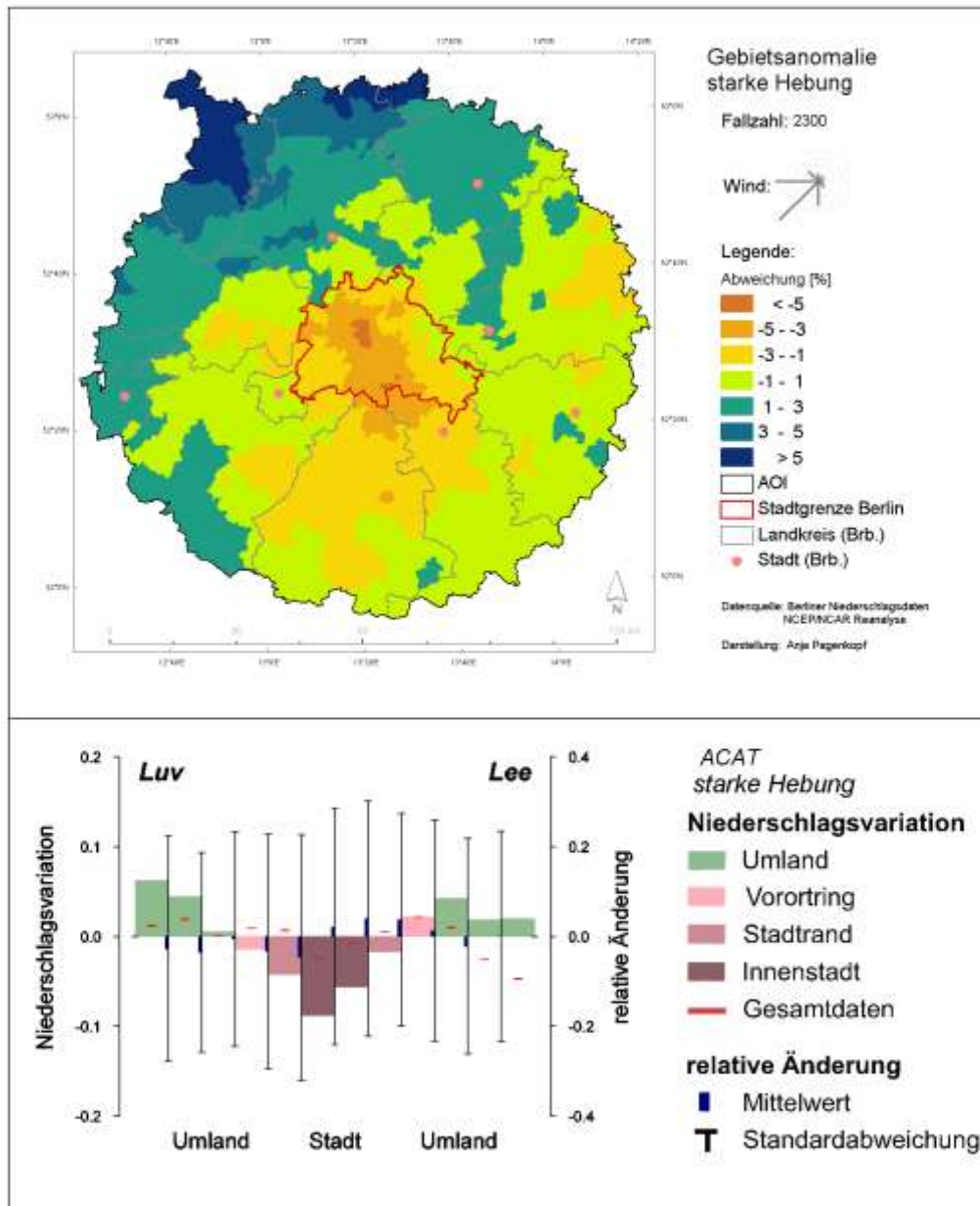
einfaktorielles Experiment: Vertikalbewegung

Name: **starke Hebung**

Beschreibung: Tage mit großräumig starker Hebung (Omegawerte aus NCEP-NCAR)

Fallzahl: 2300 mittlere Gesamtsumme: 7462 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 19 % mittlere Niederschlagshöhe: 3,2 mm

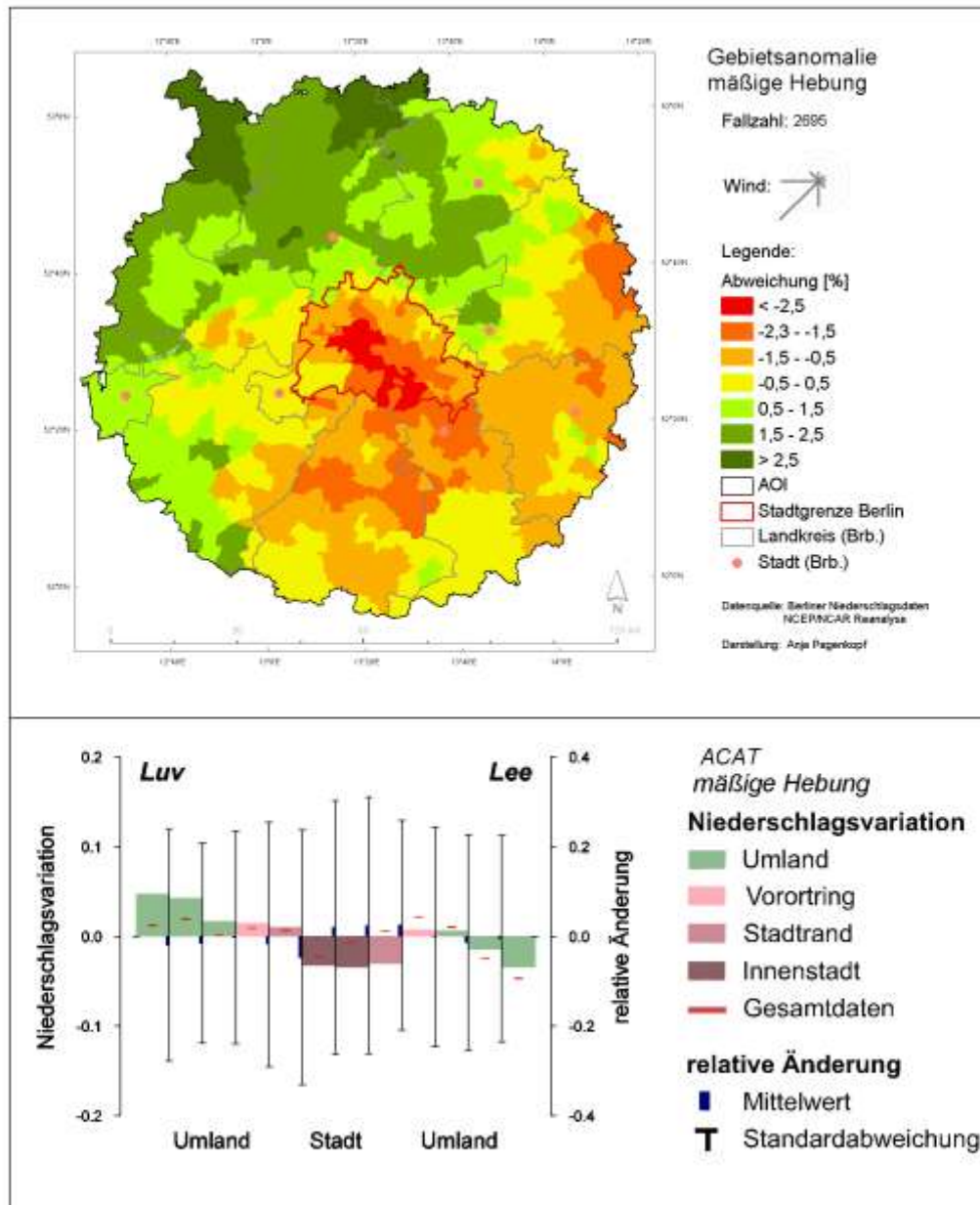


Name: **mäßige Hebung**

Beschreibung: Tage mit großräumig mäßiger Hebung (Omegawerte aus NCEP-NCAR)

Fallzahl: 2695 mittlere Gesamtsumme: 6430 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 23 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4mm



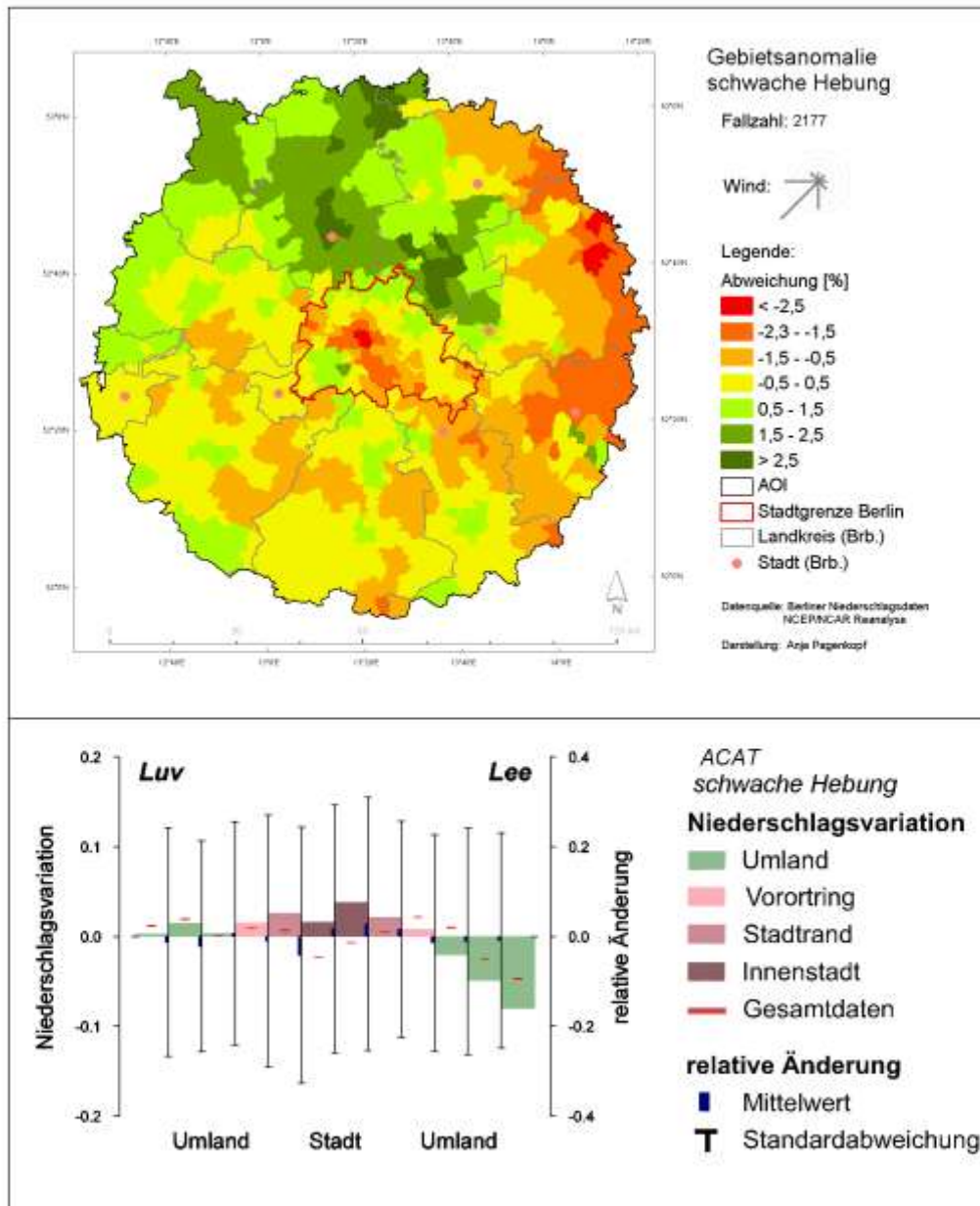
einfaktorielles Experiment: Vertikalbewegung

Name: **schwache Hebung**

Beschreibung: Tage mit großräumig schwacher Hebung (Omegawerte aus NCEP-NCAR)

Fallzahl: 2177 mittlere Gesamtsumme: 3889 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 18 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,7 mm

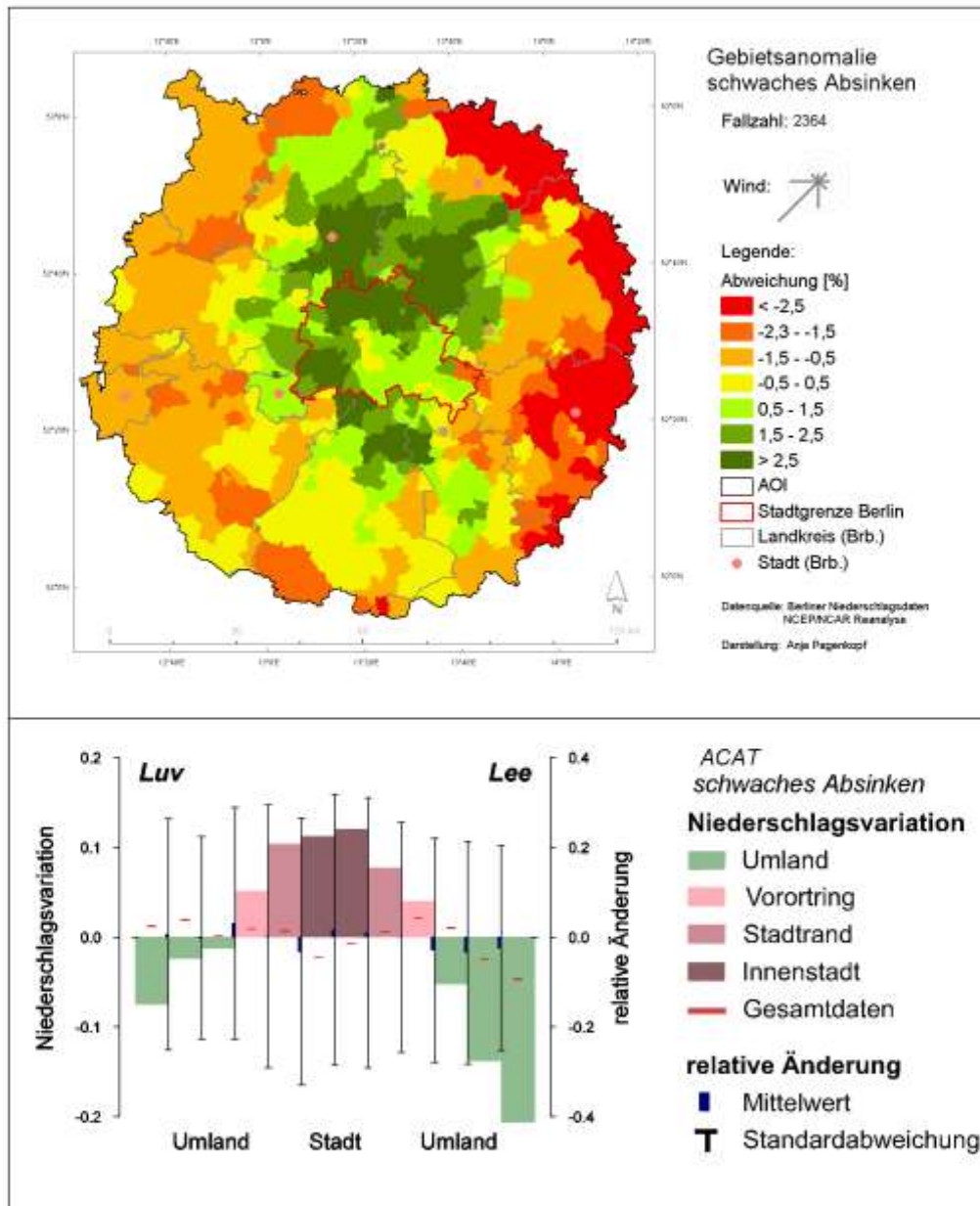


Name: **schwaches Absinken**

Beschreibung: Tage mit großräumig schwachem Absinken (Omegawerte aus NCEP-NCAR)

Fallzahl: 2364 mittlere Gesamtsumme: 3088 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 20 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,3 mm



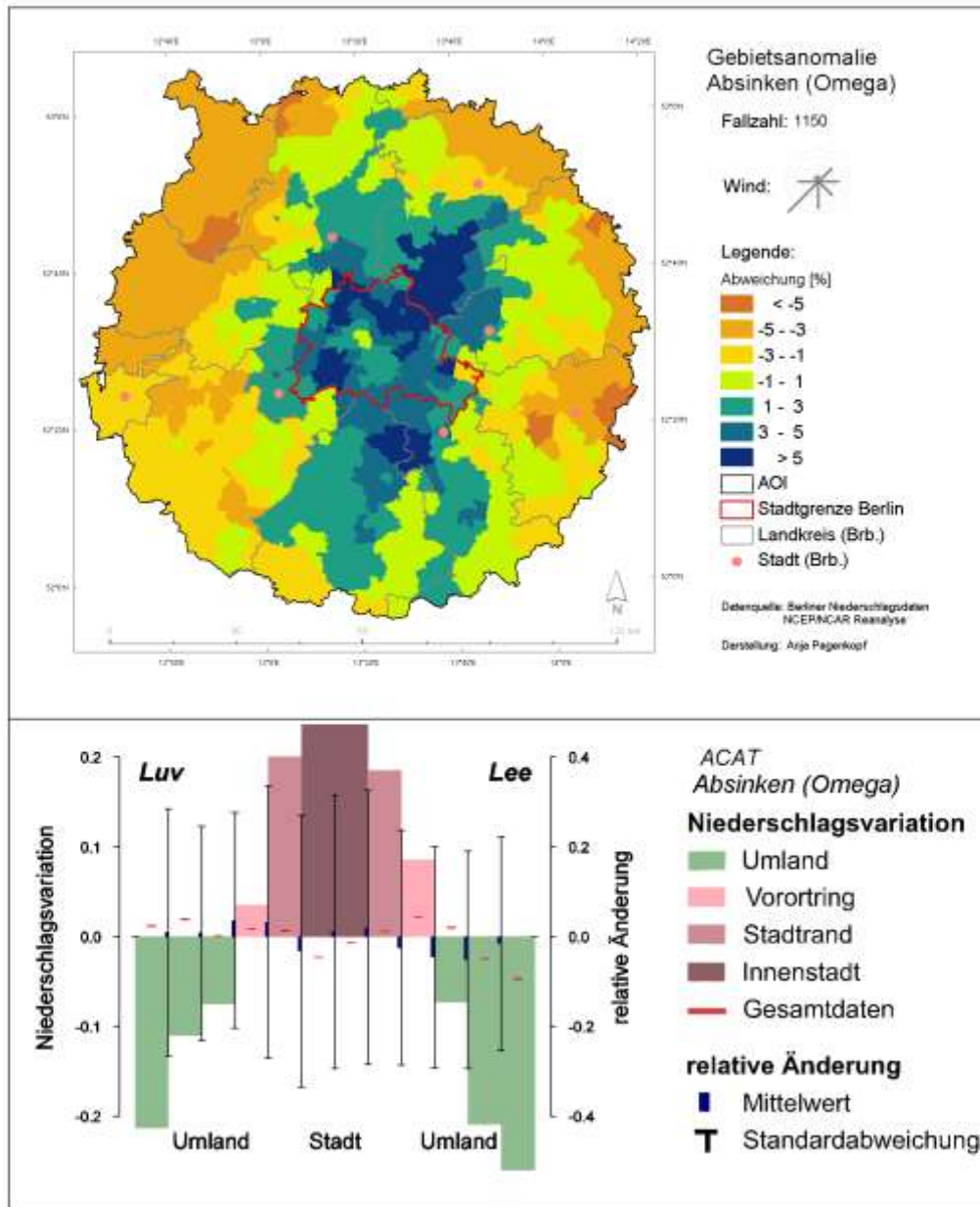
einfaktorielles Experiment: Vertikalbewegung

Name: **mäßiges Absinken (Omega)**

Beschreibung: Tage mit großräumigem Absinken (90 Perzentil der Omegawerte aus NCEP-NCAR)

Fallzahl: 1150 mittlere Gesamtsumme: 1003 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 9,7 % mittlere Niederschlagshöhe: 0,9 mm



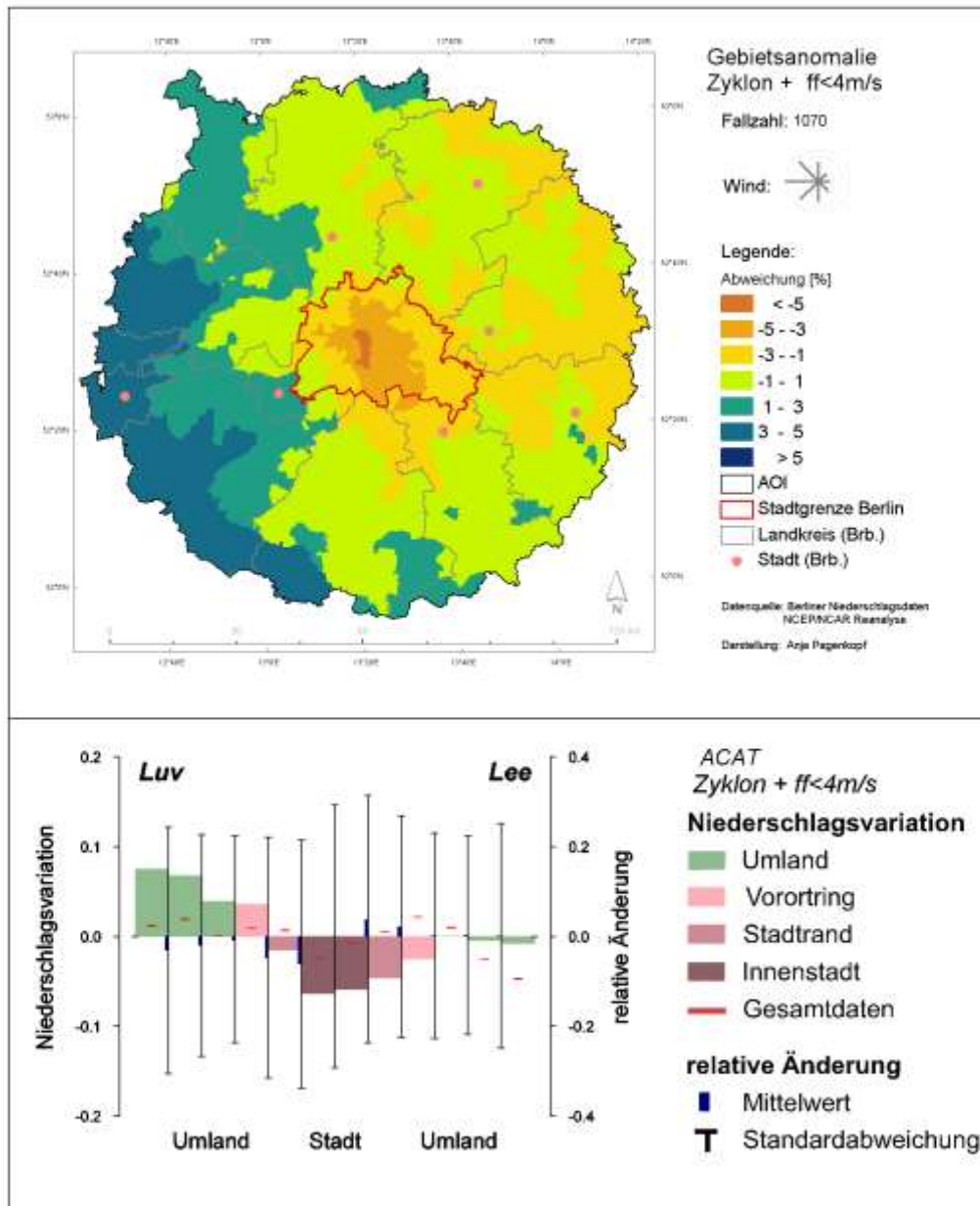
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

Name: **mit Frontpassage bei geringer Windgeschwindigkeit**

Beschreibung: Tage mit Frontpassage und schwachem Wind

Fallzahl: 1070 mittlere Gesamtsumme: 3417 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 9,0 % mittlere Niederschlagshöhe: 3,2 mm



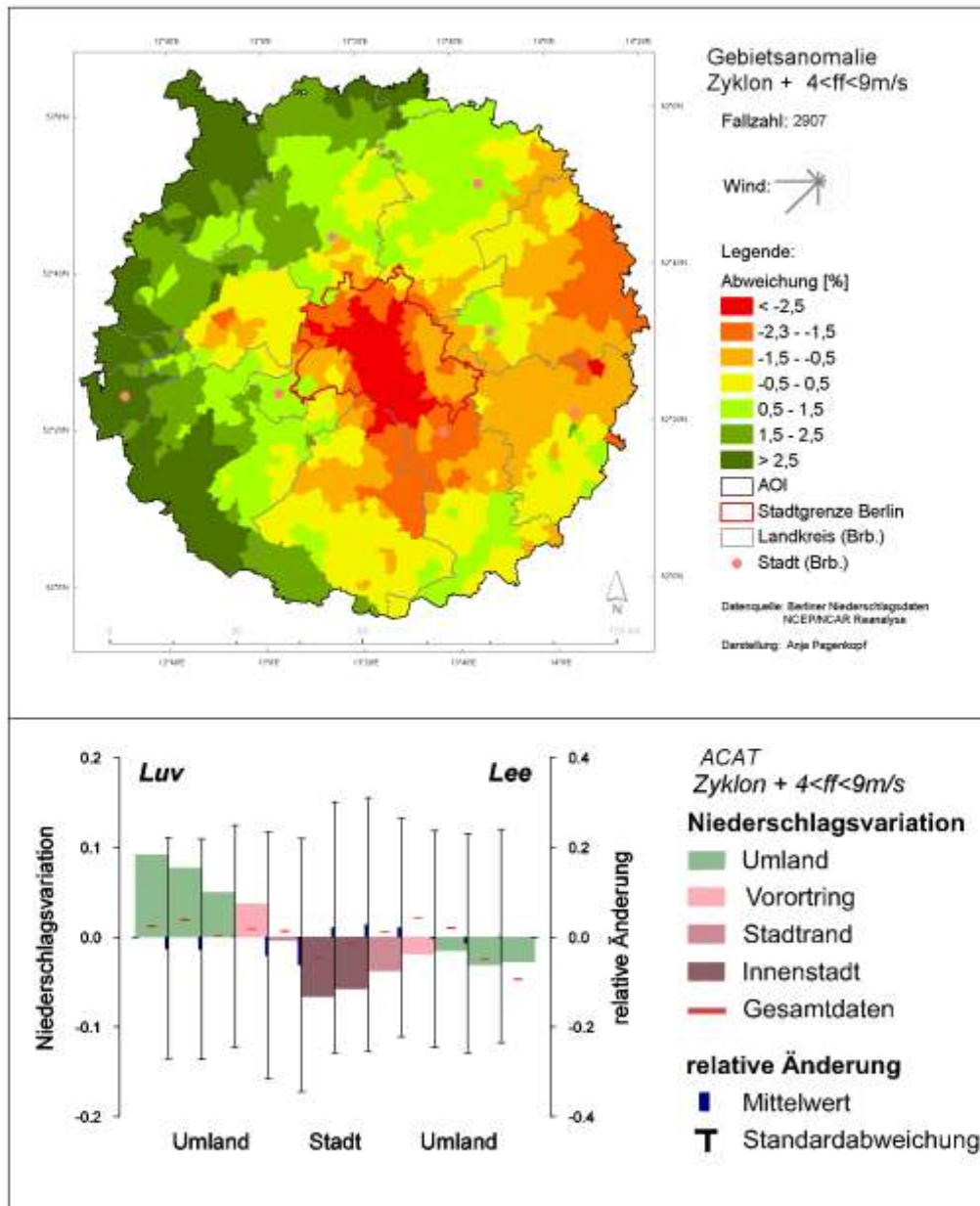
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

Name: mit Frontpassage bei mittlerer Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage mit Frontpassage und mittlerer Windgeschwindigkeit

Fallzahl: 2907 **mittlere Gesamtsumme:** 7569 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 25 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,6 mm



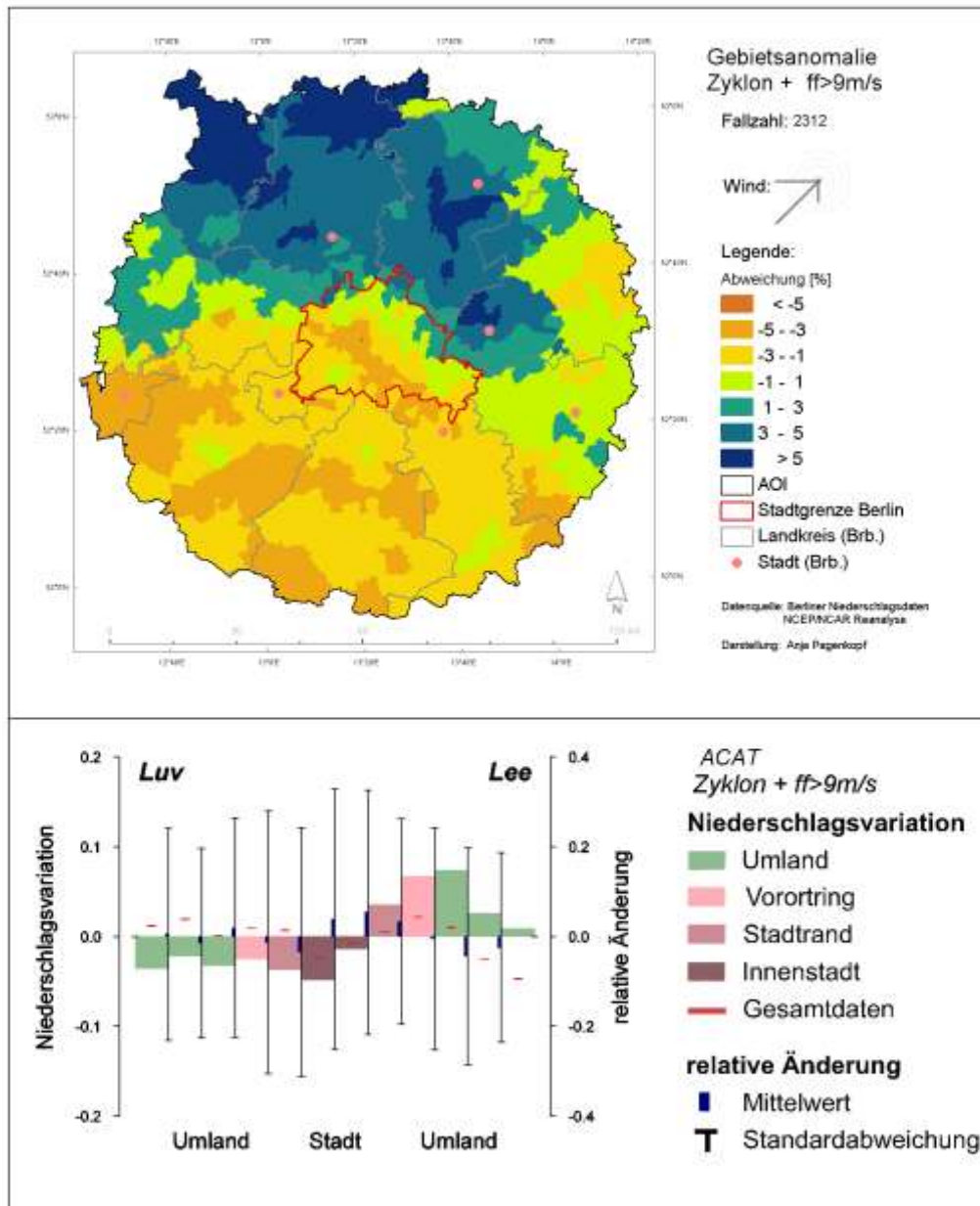
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

Name: mit Frontpassage bei hoher Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage mit Frontpassage und starker Wind

Fallzahl: 2312 **mittlere Gesamtsumme:** 6582 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 20 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,8 mm



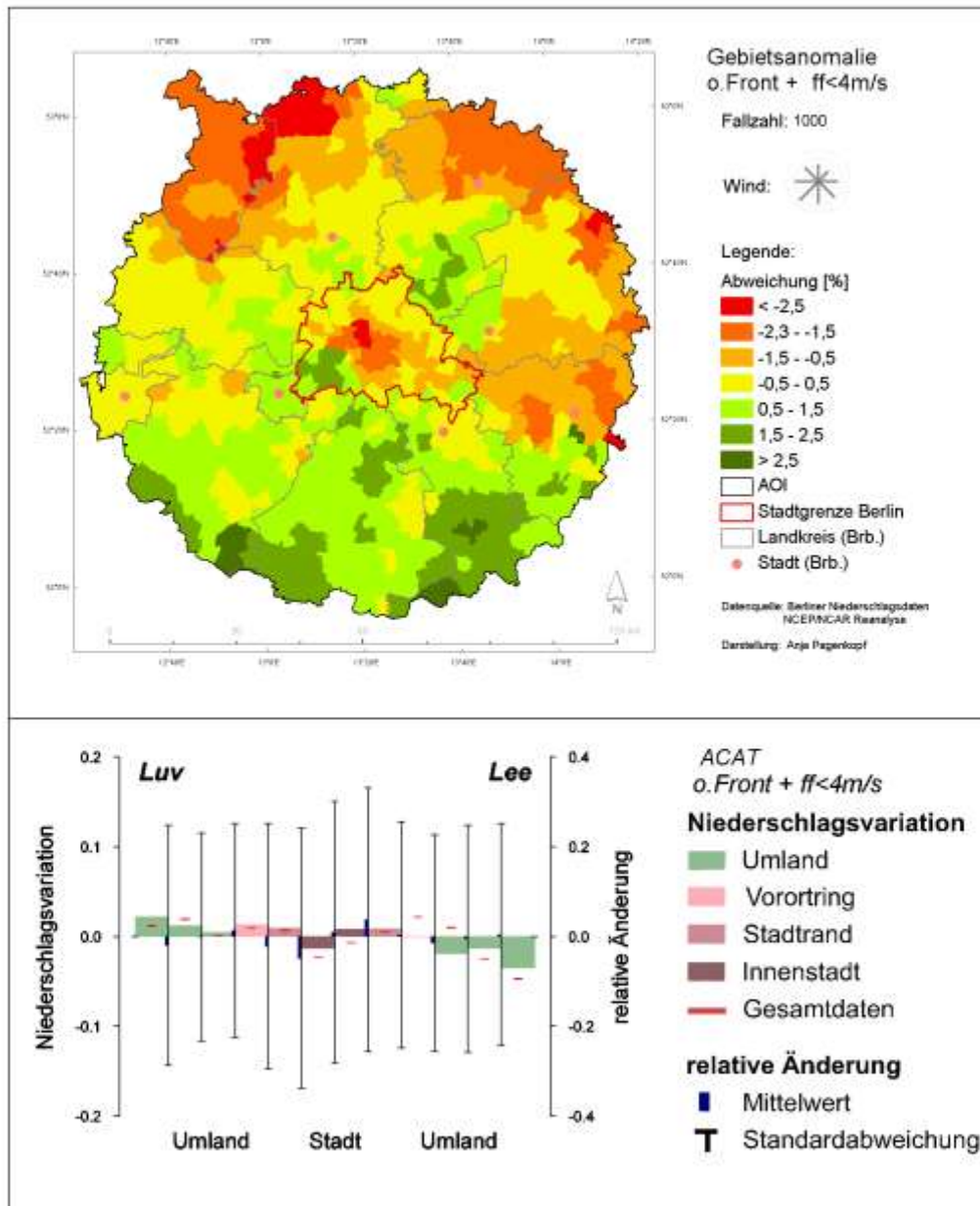
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

Name: ohne Frontpassage bei geringer Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage ohne Frontpassage und schwachem Wind

Fallzahl: 1000 **mittlere Gesamtsumme:** 2336 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 8,4 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,3 mm



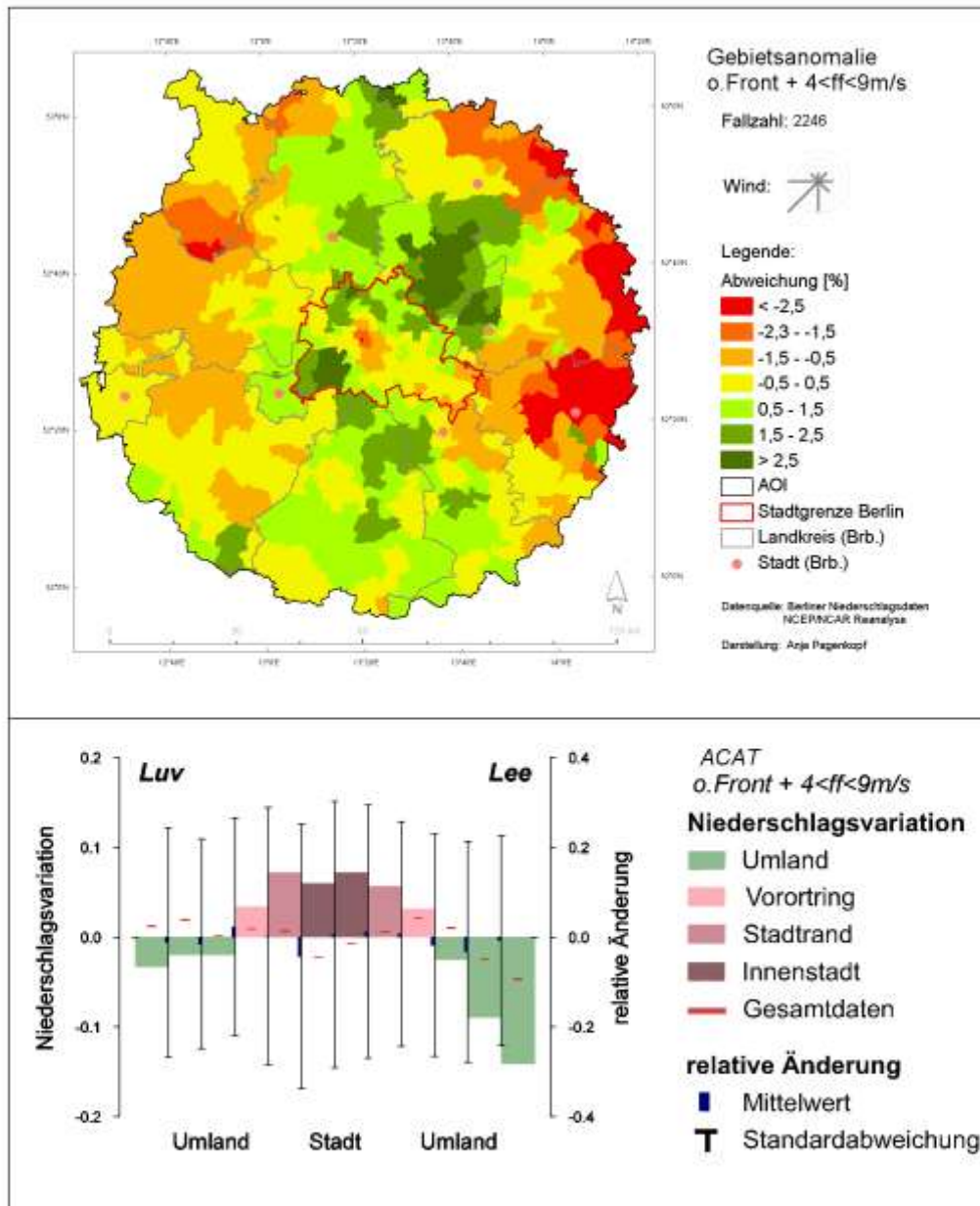
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

Name: ohne Frontpassage bei mittlerer Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage ohne Frontpassage und mittlerer Windgeschwindigkeit

Fallzahl: 2246 **mittlere Gesamtsumme:** 4653 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 19 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,1 mm



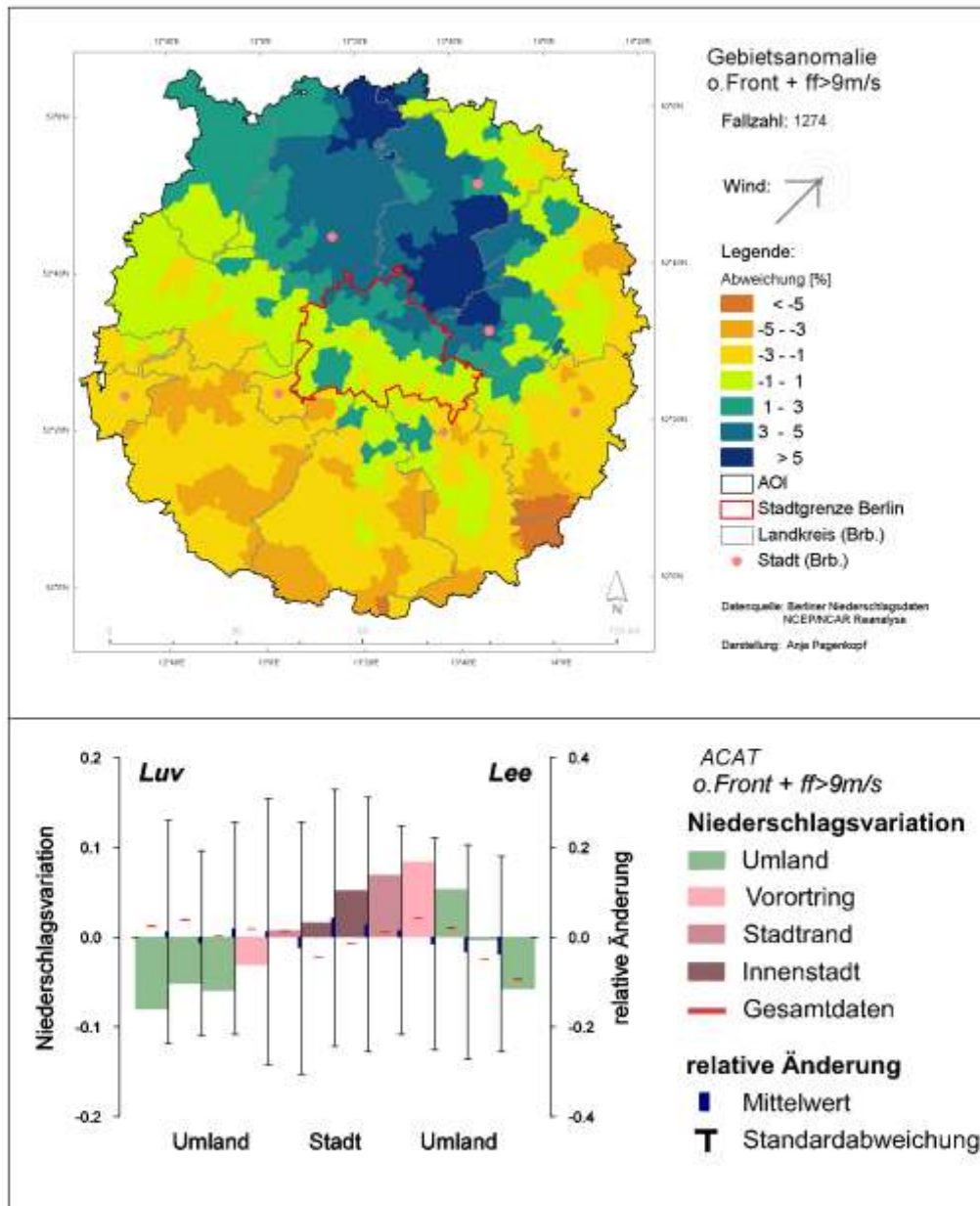
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windgeschwindigkeit

Name: ohne Frontpassage bei hoher Windgeschwindigkeit

Beschreibung: Tage ohne Frontpassage und starkem Wind

Fallzahl: 1274 **mittlere Gesamtsumme:** 2764 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 11 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,2 mm



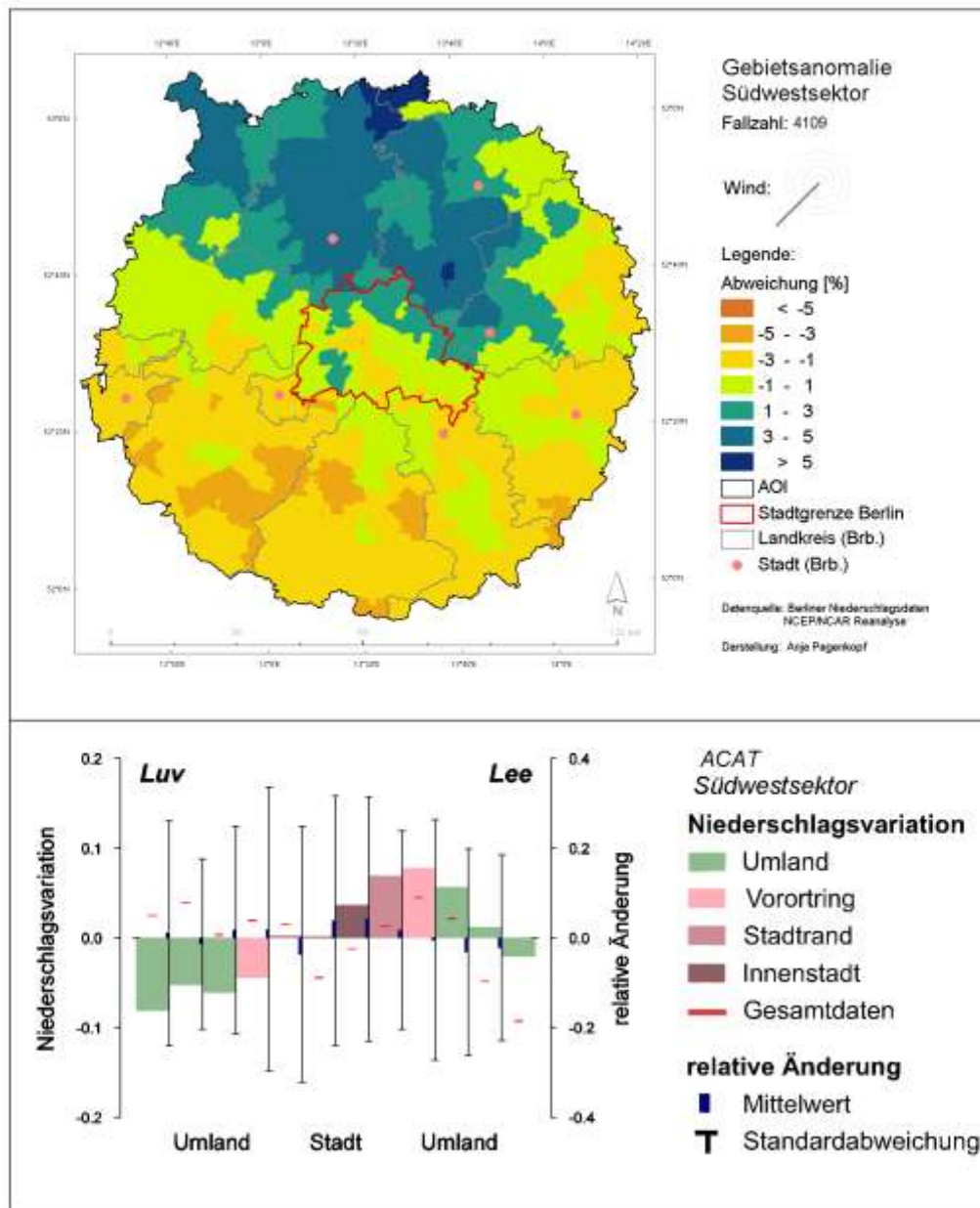
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Südwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 202,5° und 247,5° lag

Fallzahl: 4109 mittlere Gesamtsumme: 9959 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 35 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm



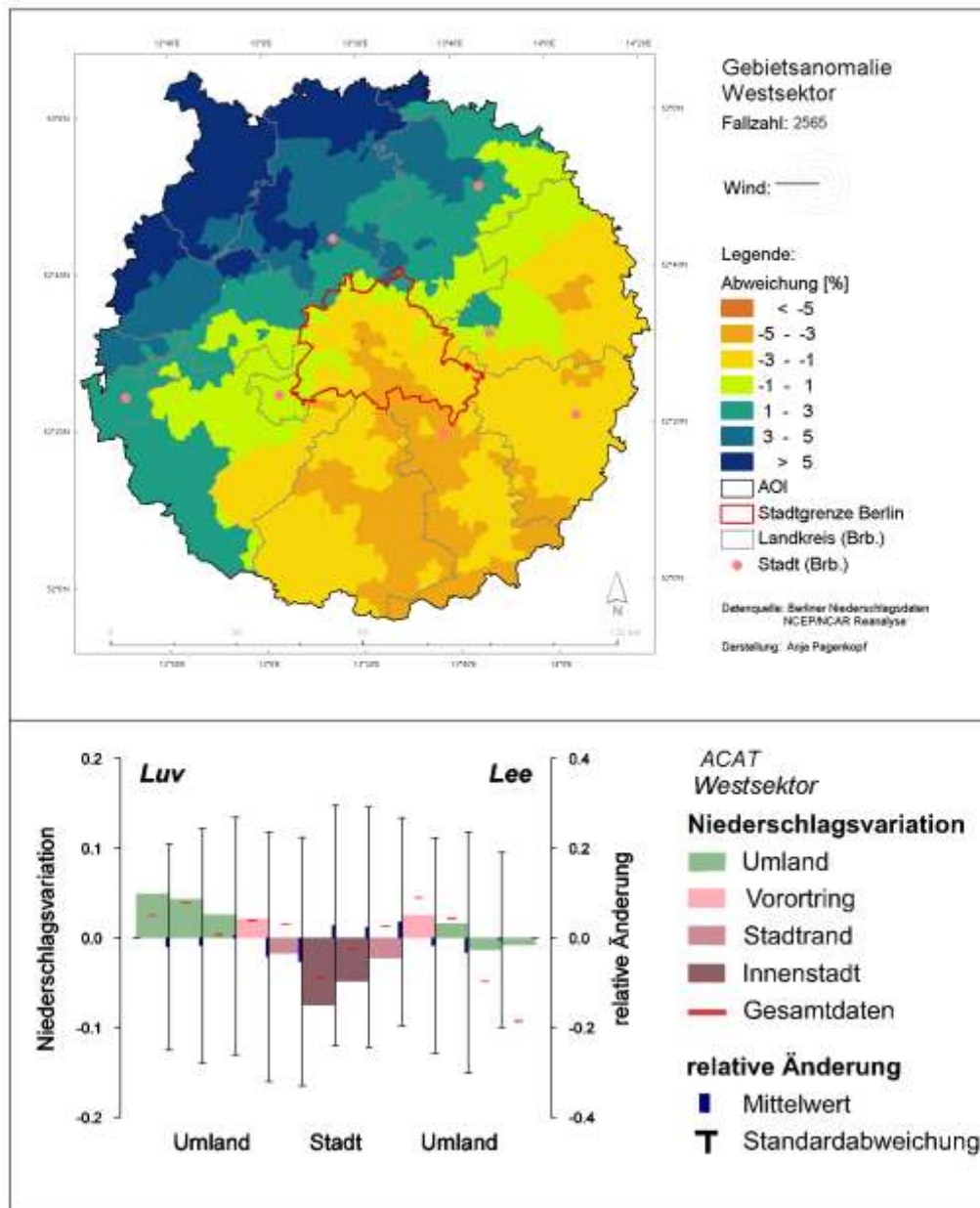
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Westsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 247,5° und 292,5° lag

Fallzahl: 2565 mittlere Gesamtsumme: 6525 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 22 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,5 mm



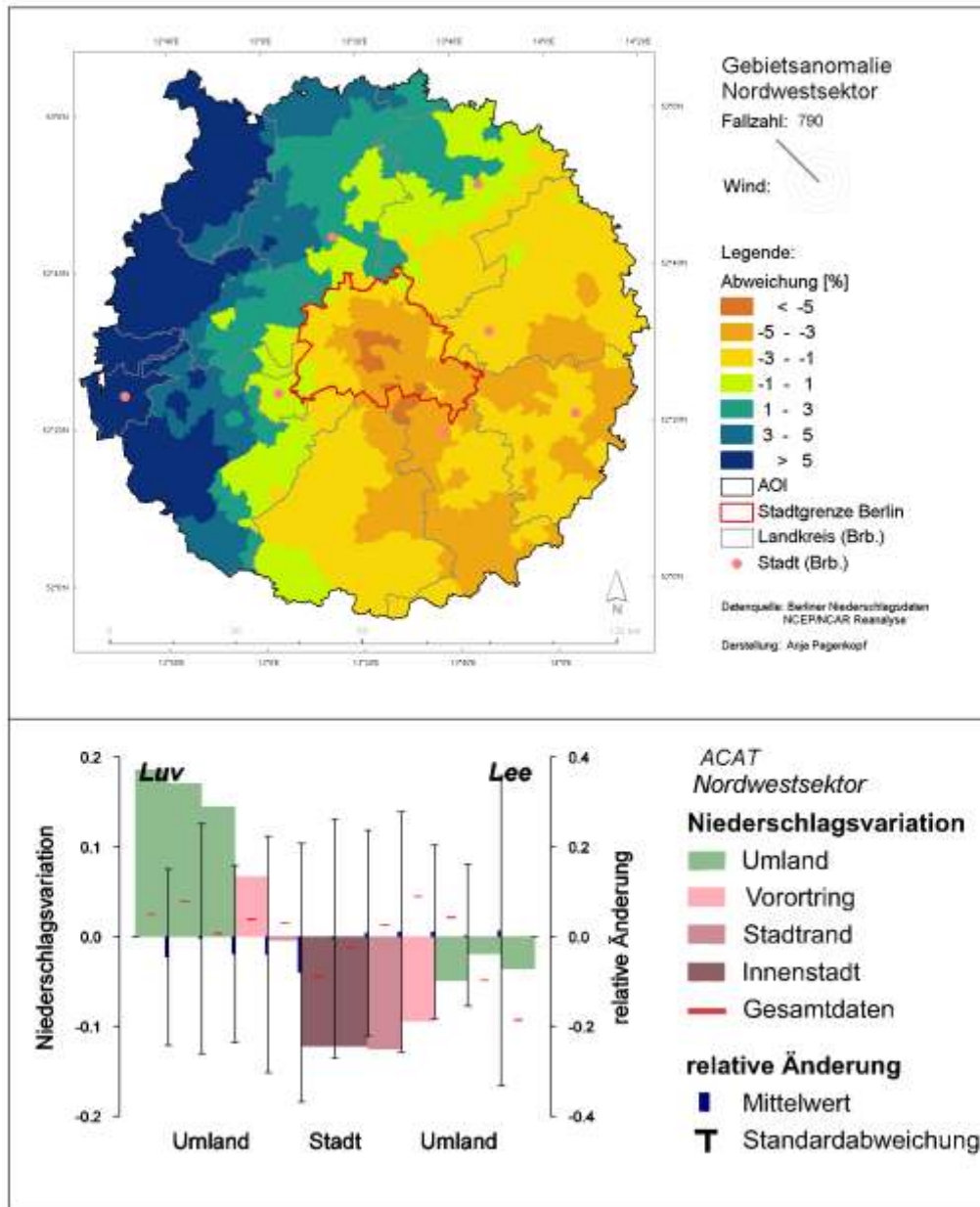
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Nordwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 292,5° und 337,5° lag

Fallzahl: 790 mittlere Gesamtsumme: 1903 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 6,7 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,4 mm



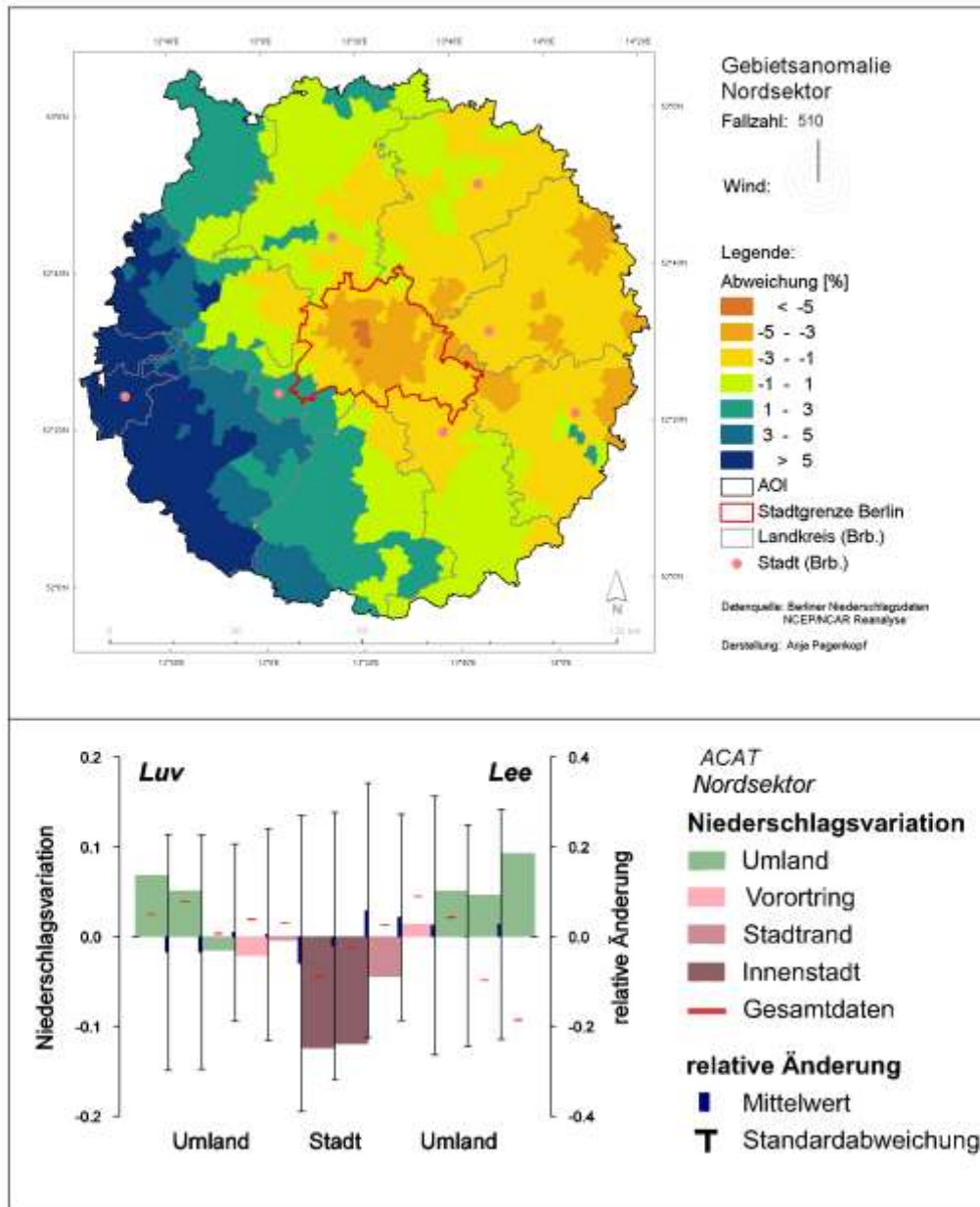
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Nordsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 337,5° und 22,5° lag

Fallzahl: 510 mittlere Gesamtsumme: 1139 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 4,3 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,2 mm



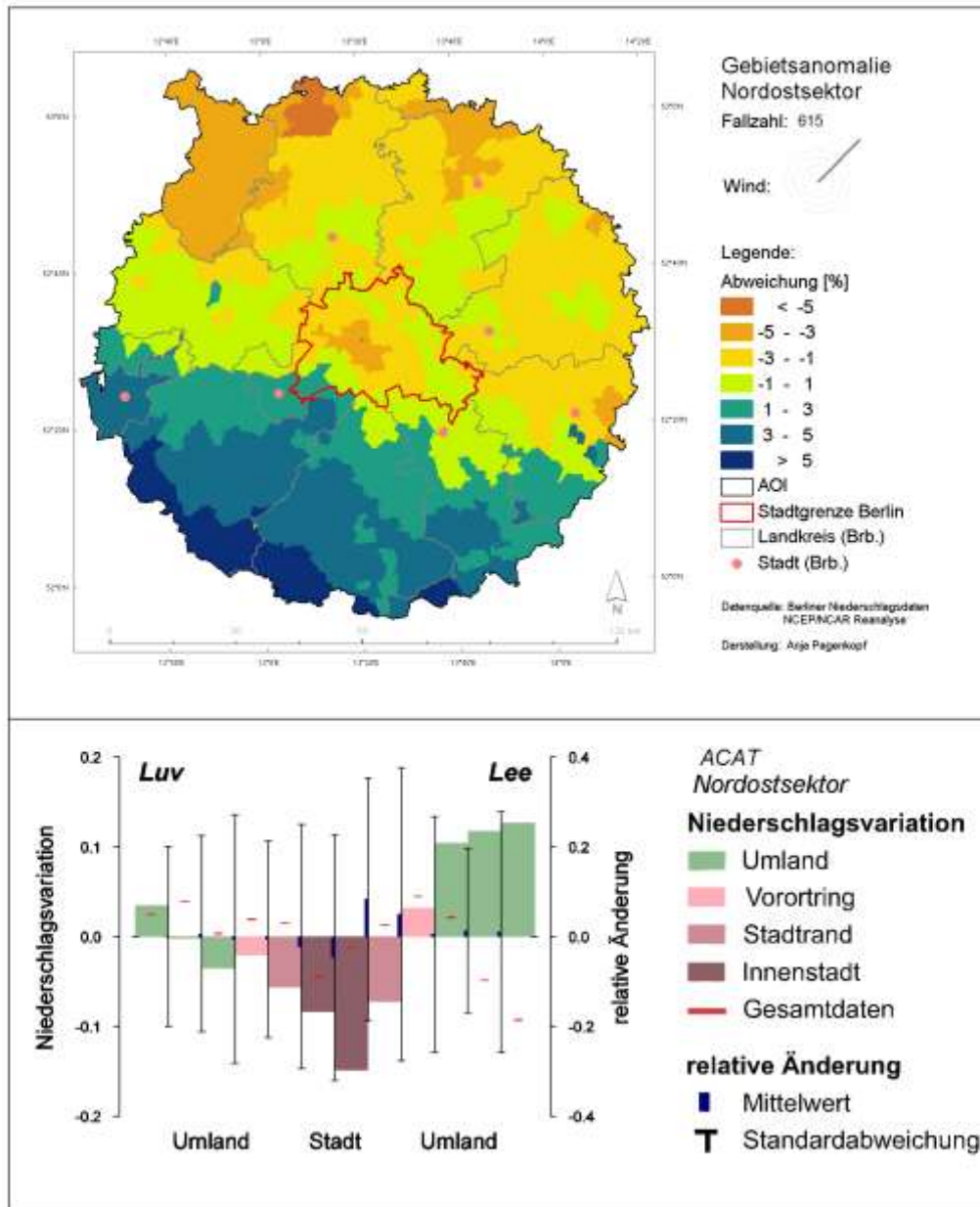
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Nordostsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 22,5° und 67,5° lag

Fallzahl: 615 mittlere Gesamtsumme: 1511 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 5,2 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,5 mm



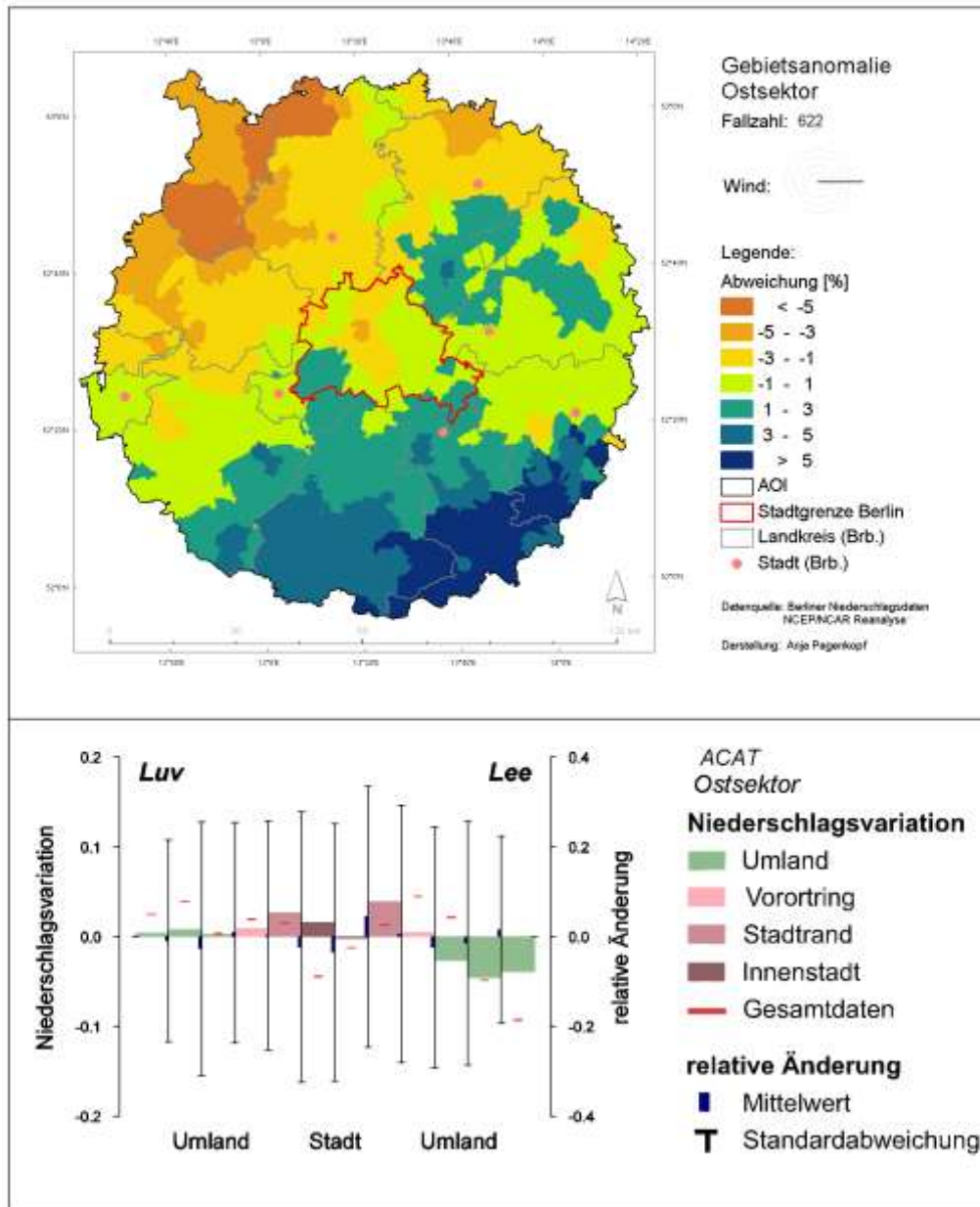
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Ostsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 67,5° und 112,5° lag

Fallzahl: 622 mittlere Gesamtsumme: 1448 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 5,2 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,3 mm



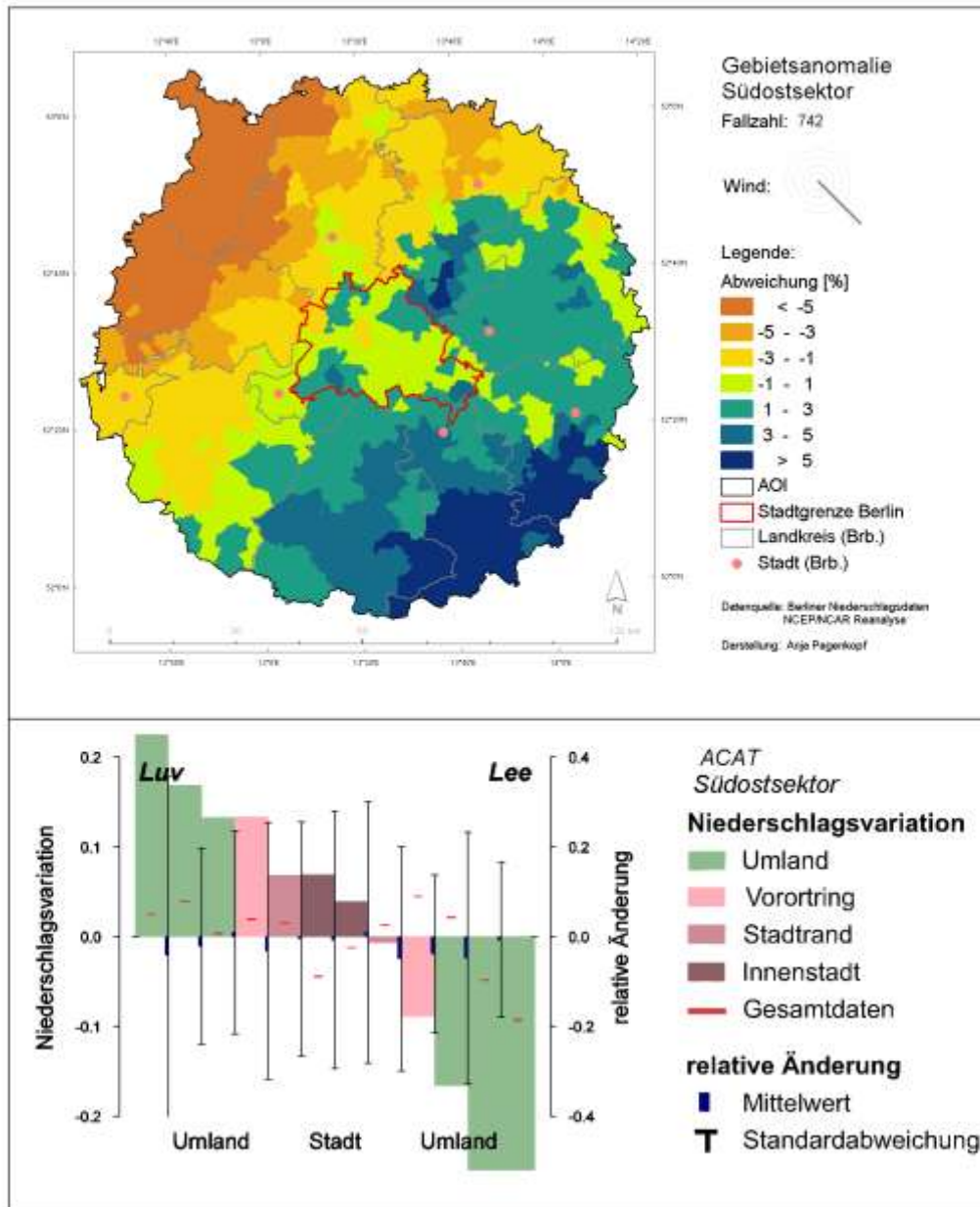
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Südostsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 112,5° und 157,5° lag

Fallzahl: 742 mittlere Gesamtsumme: 1638 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 6,3 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,2 mm



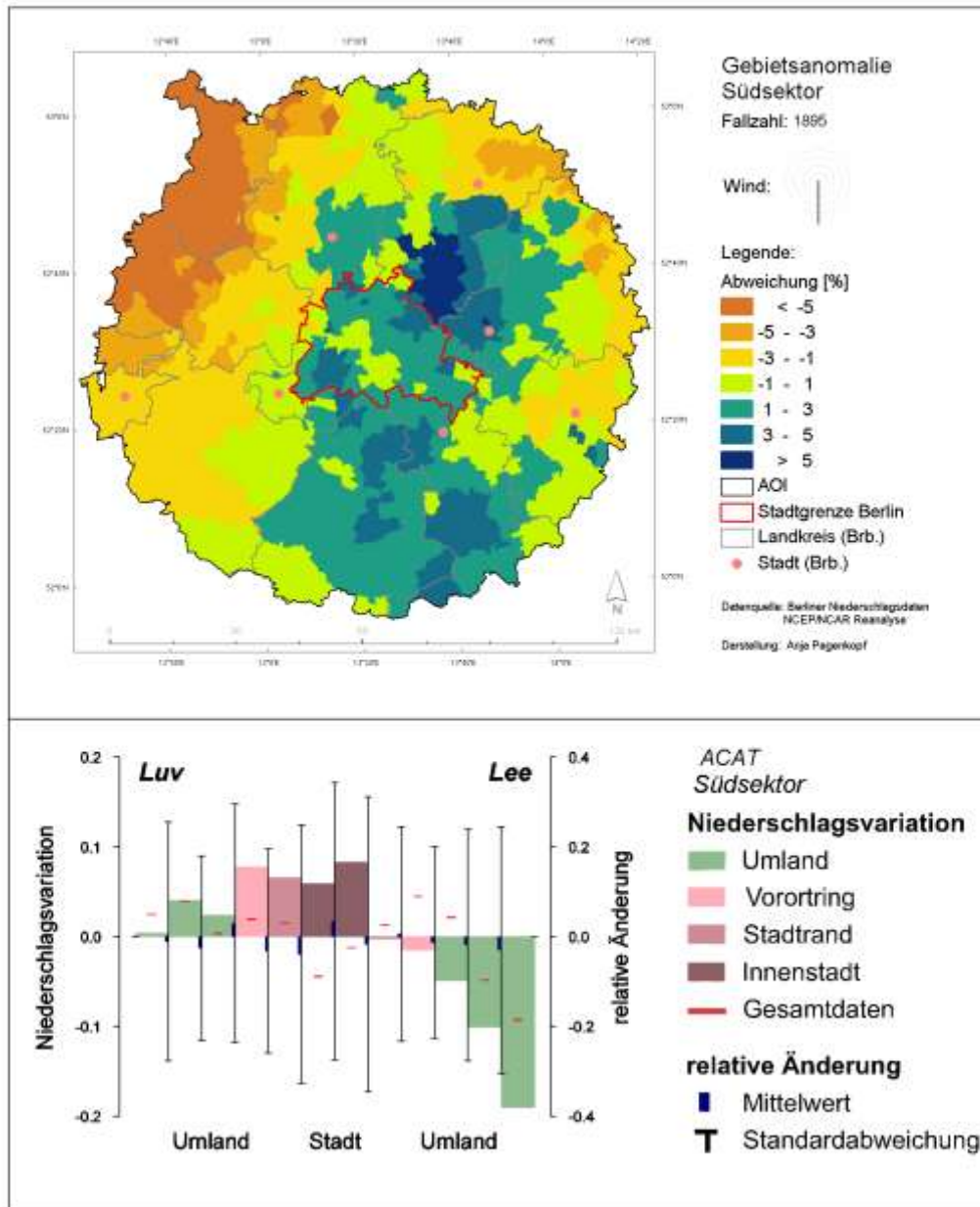
einfaktorielles Experiment: Windrichtung

Name: **Südsektor**

Beschreibung: Tage an denen die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 157,5° und 202,5° lag

Fallzahl: 1895 mittlere Gesamtsumme: 3534 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 16 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,9 mm



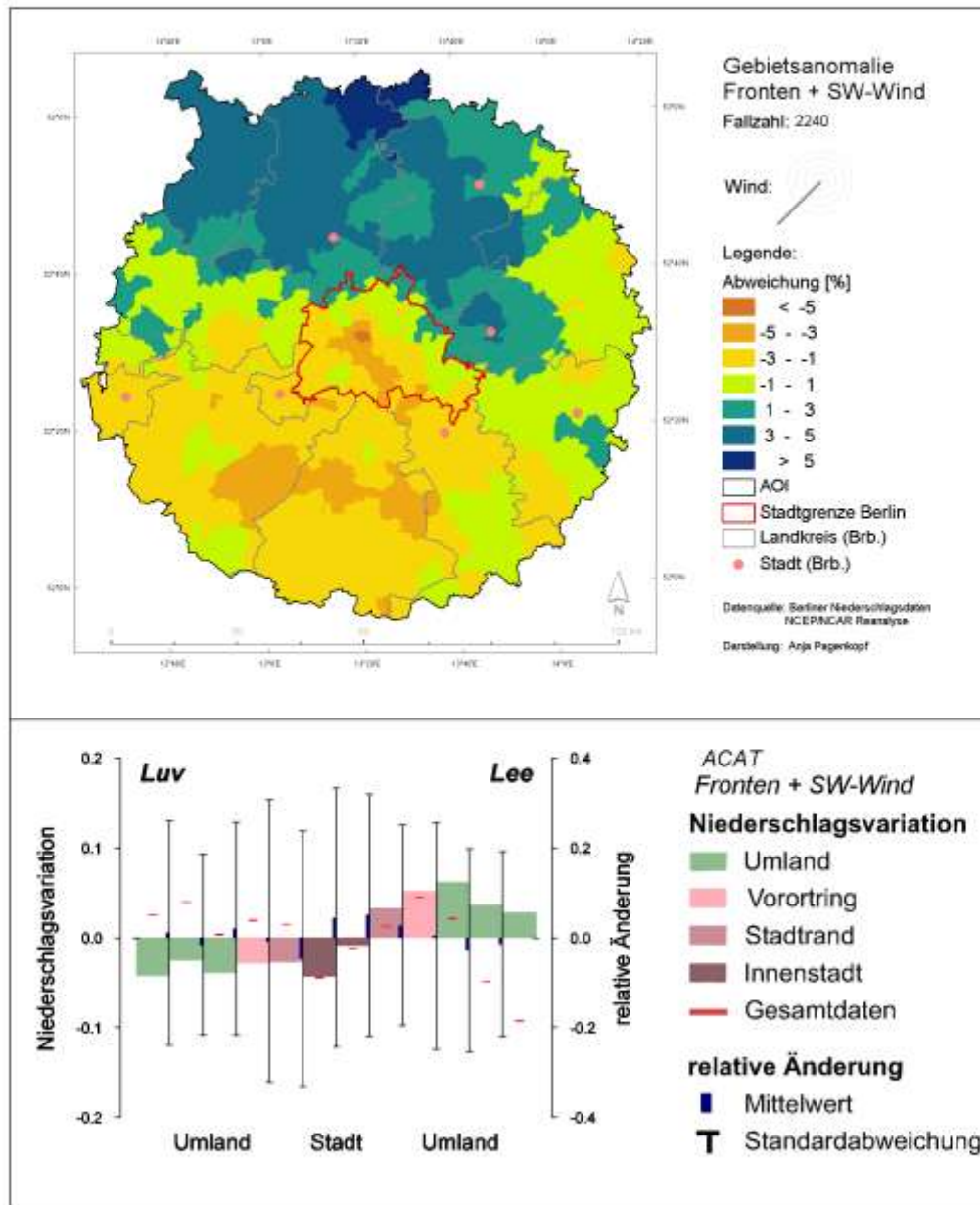
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **mit Frontpassage bei Wind aus dem Südwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 202,5° und 247,5° lag

Fallzahl: 2240 mittlere Gesamtsumme: 6453 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 19 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,9 mm



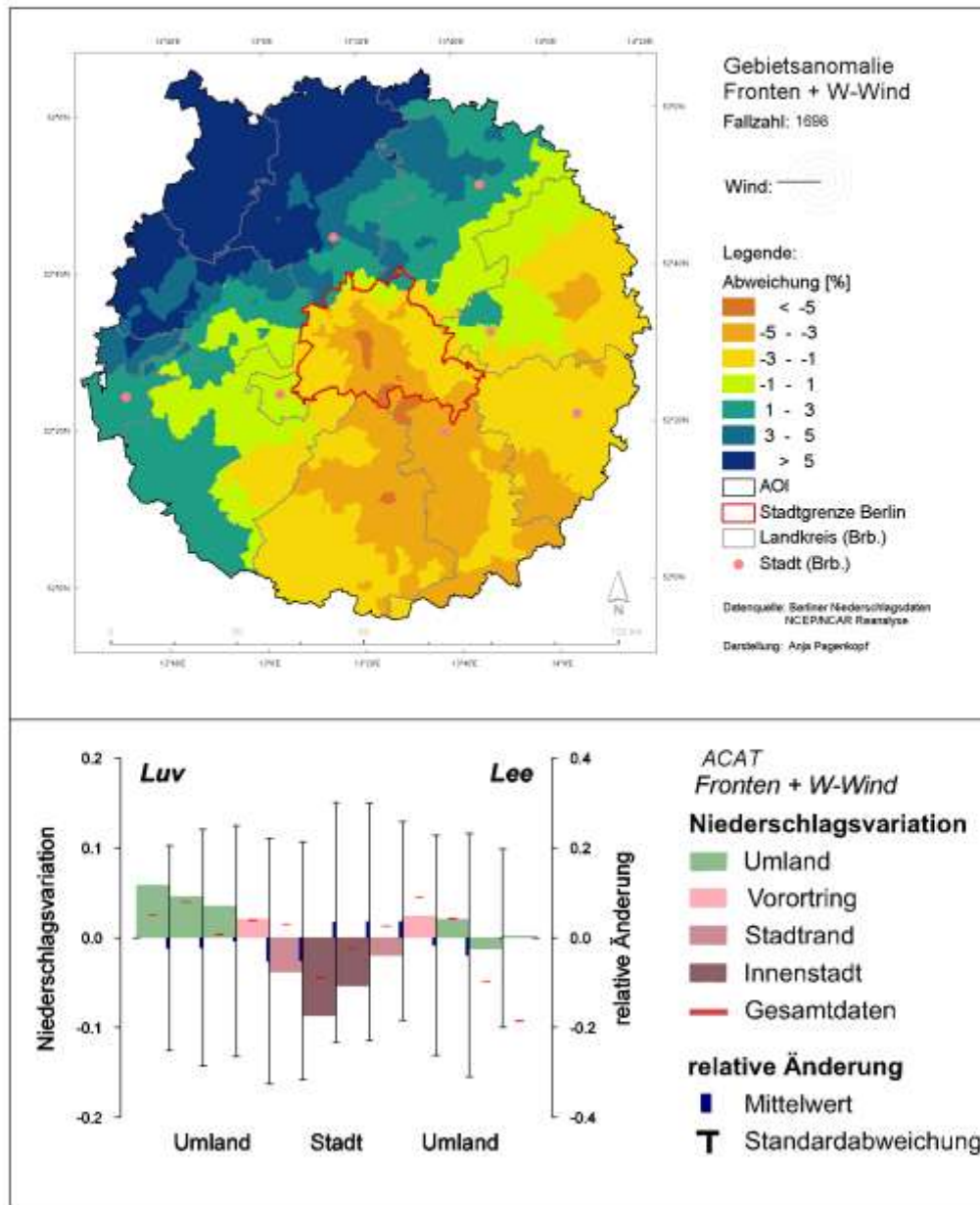
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: mit Frontpassage bei Wind aus dem Westsektor

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 202,5° und 247,5° lag

Fallzahl: 1698 mittlere Gesamtsumme: 4996 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 14 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,9 mm



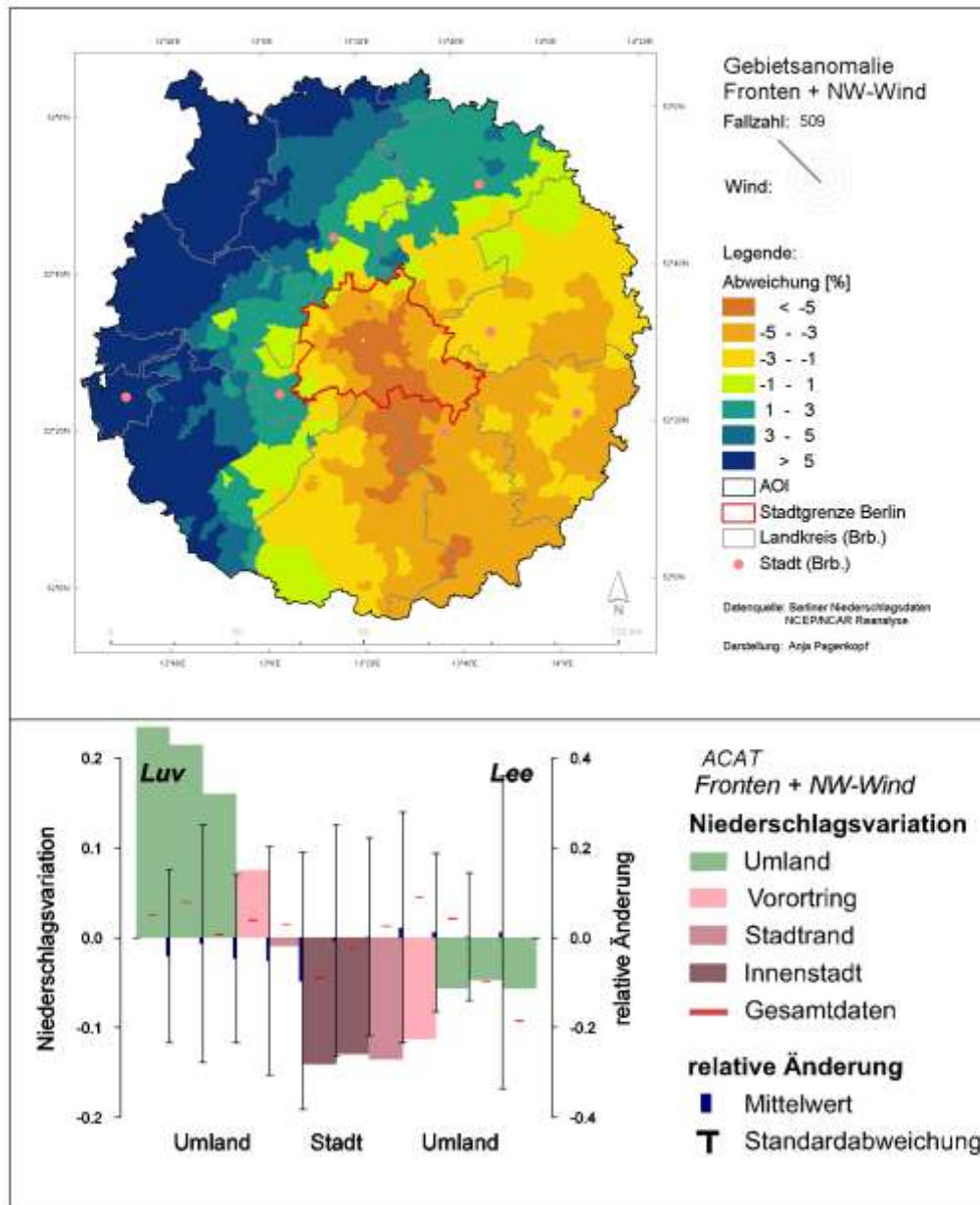
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **mit Frontpassage bei Wind aus dem Nordwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 247,5° und 337,5° lag

Fallzahl: 509 mittlere Gesamtsumme: 1402 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 4,3 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,8 mm



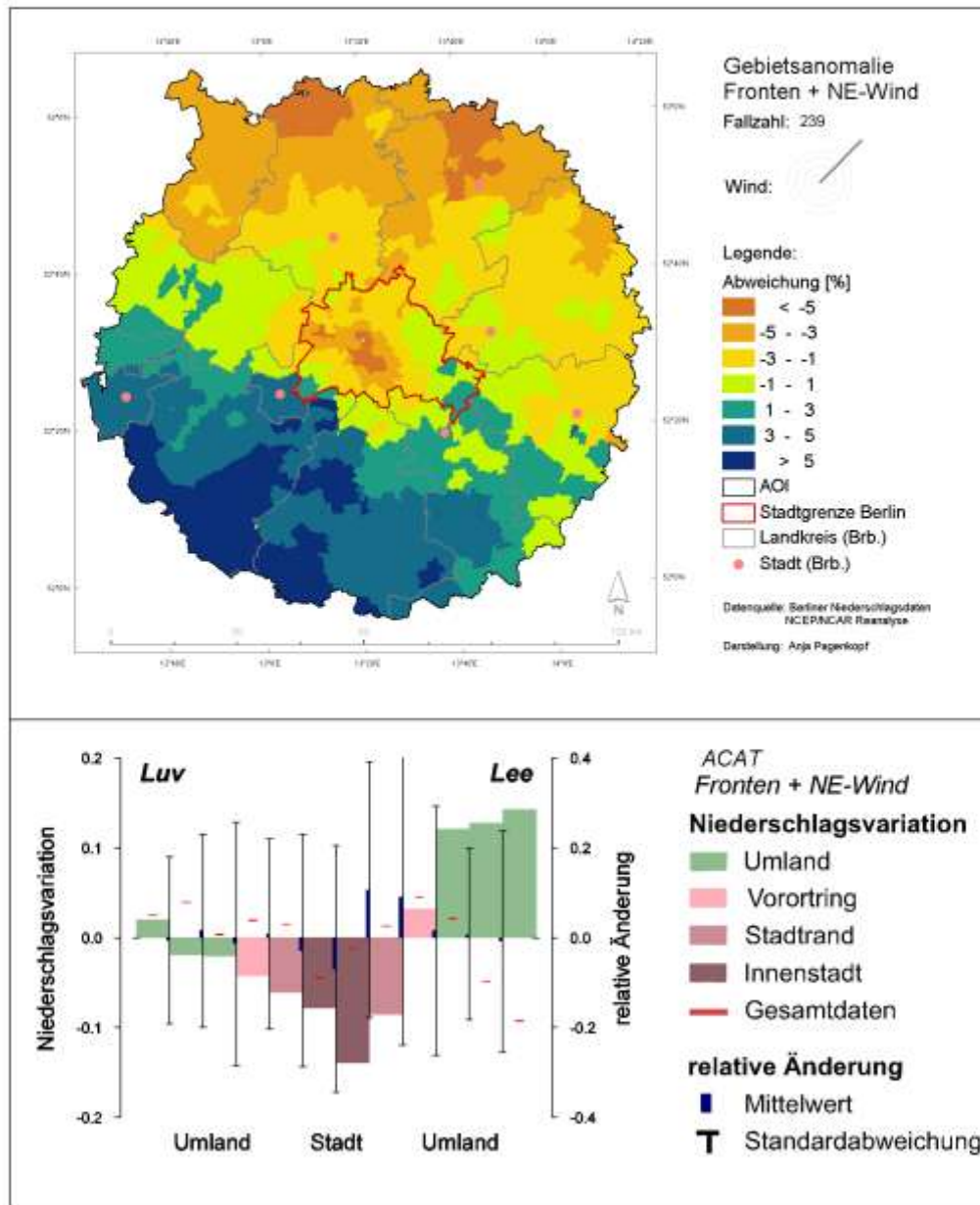
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **mit Frontpassage bei Wind aus dem Nordostsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 22,5° und 67,5° lag

Fallzahl: 239 mittlere Gesamtsumme: 731 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 2,0 % mittlere Niederschlagshöhe: 3,0 mm



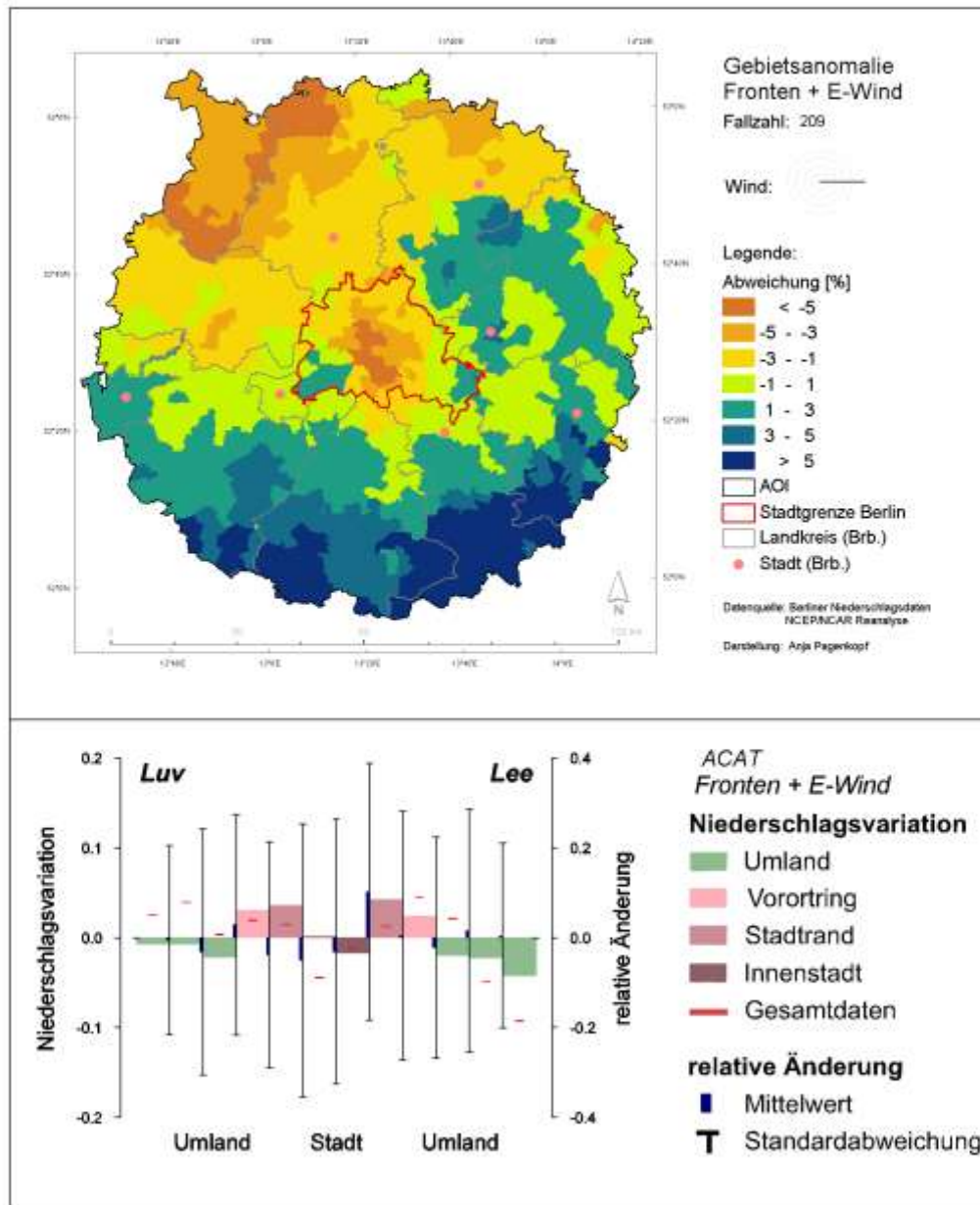
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: mit Frontpassage bei Wind aus dem Ostsektor

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 67,5° und 112,5° lag

Fallzahl: 209 **mittlere Gesamtsumme:** 673 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 1,8 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 3,2 mm



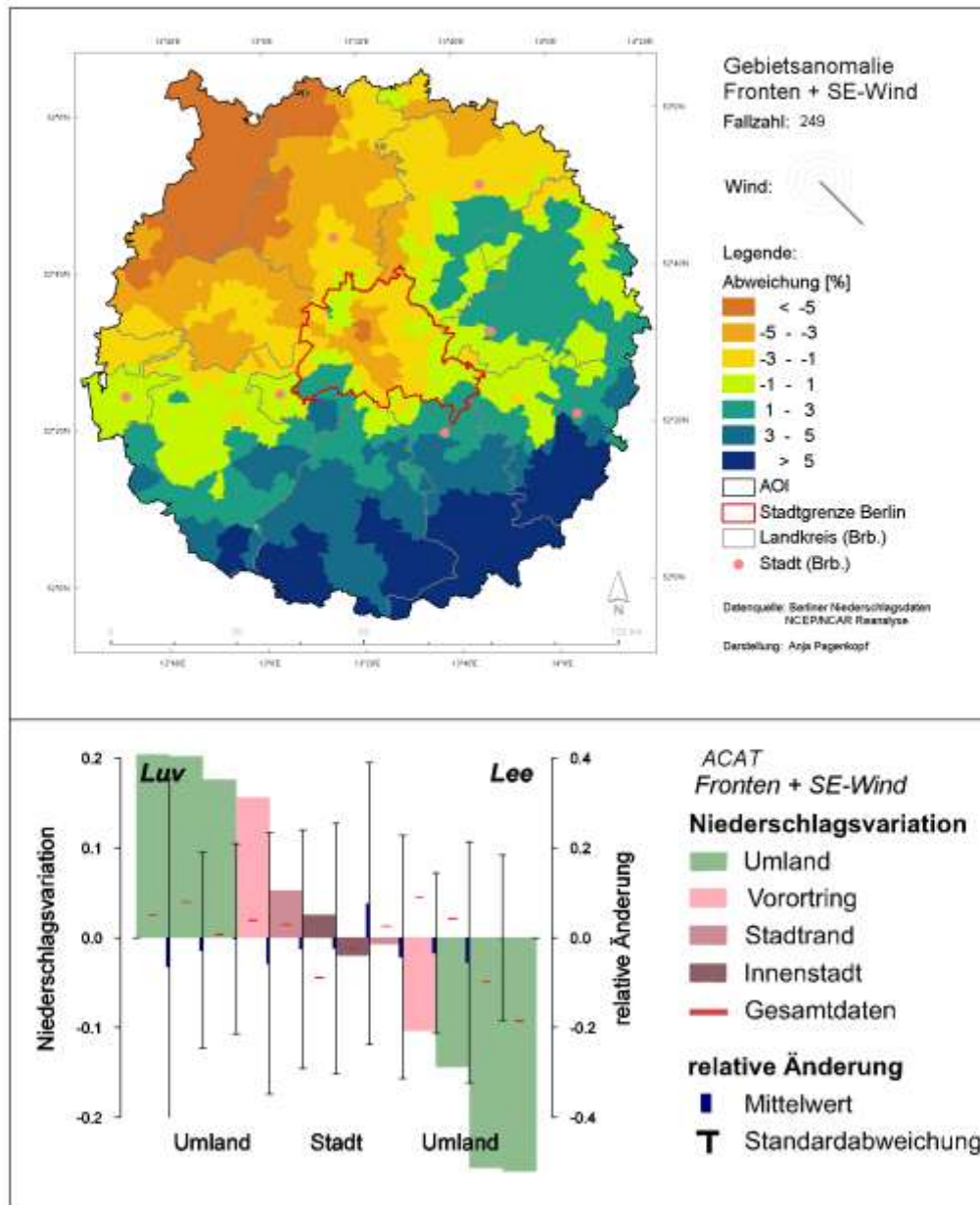
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **mit Frontpassage bei Wind aus dem Südostsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 112,5° und 157,5° lag

Fallzahl: 249 mittlere Gesamtsumme: 758 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 2,1 % mittlere Niederschlagshöhe: 3,0 mm



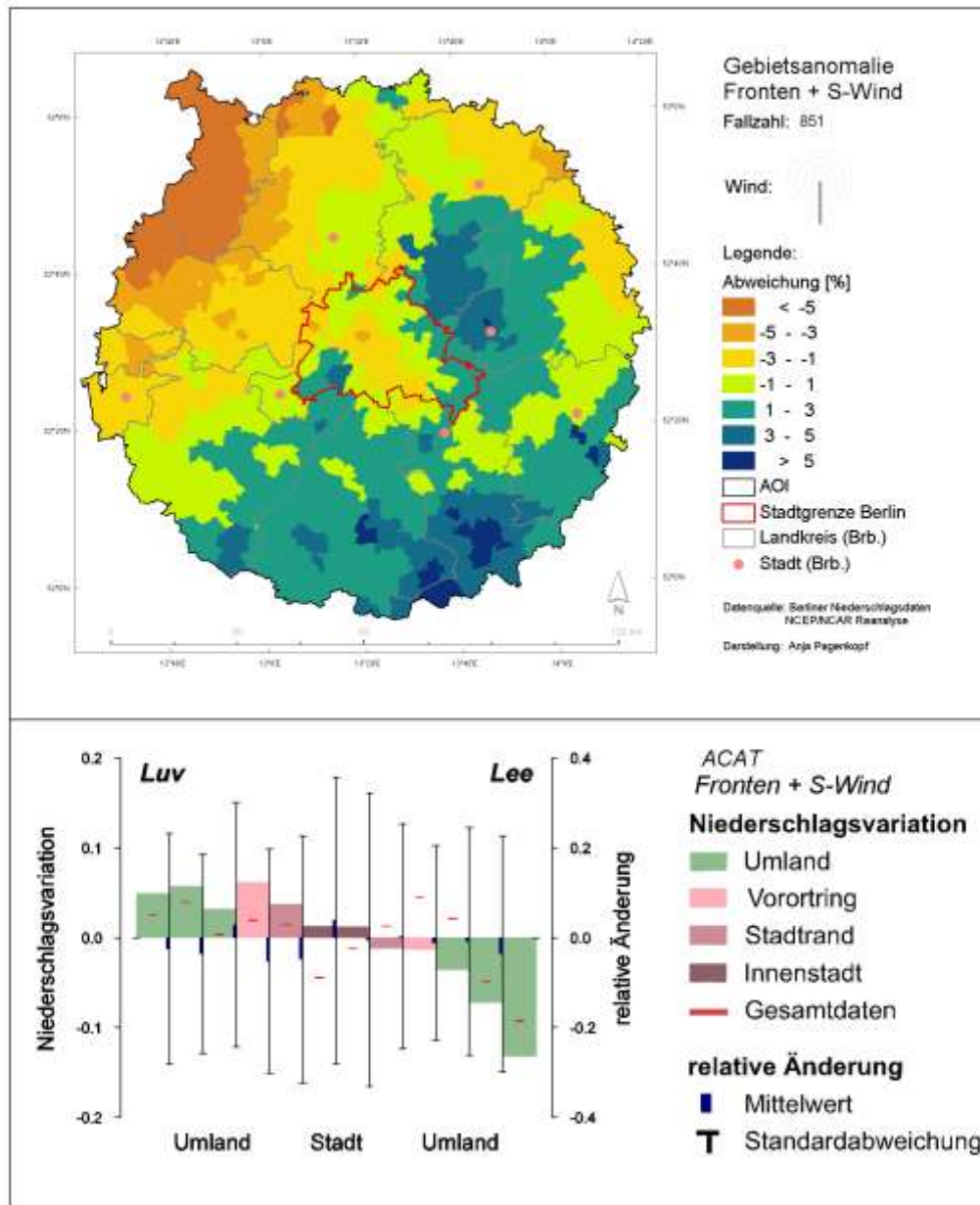
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **mit Frontpassage bei Wind aus dem Südsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 157,5° und 202,5° lag

Fallzahl: 851 mittlere Gesamtsumme: 1803 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 7,2 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,1 mm



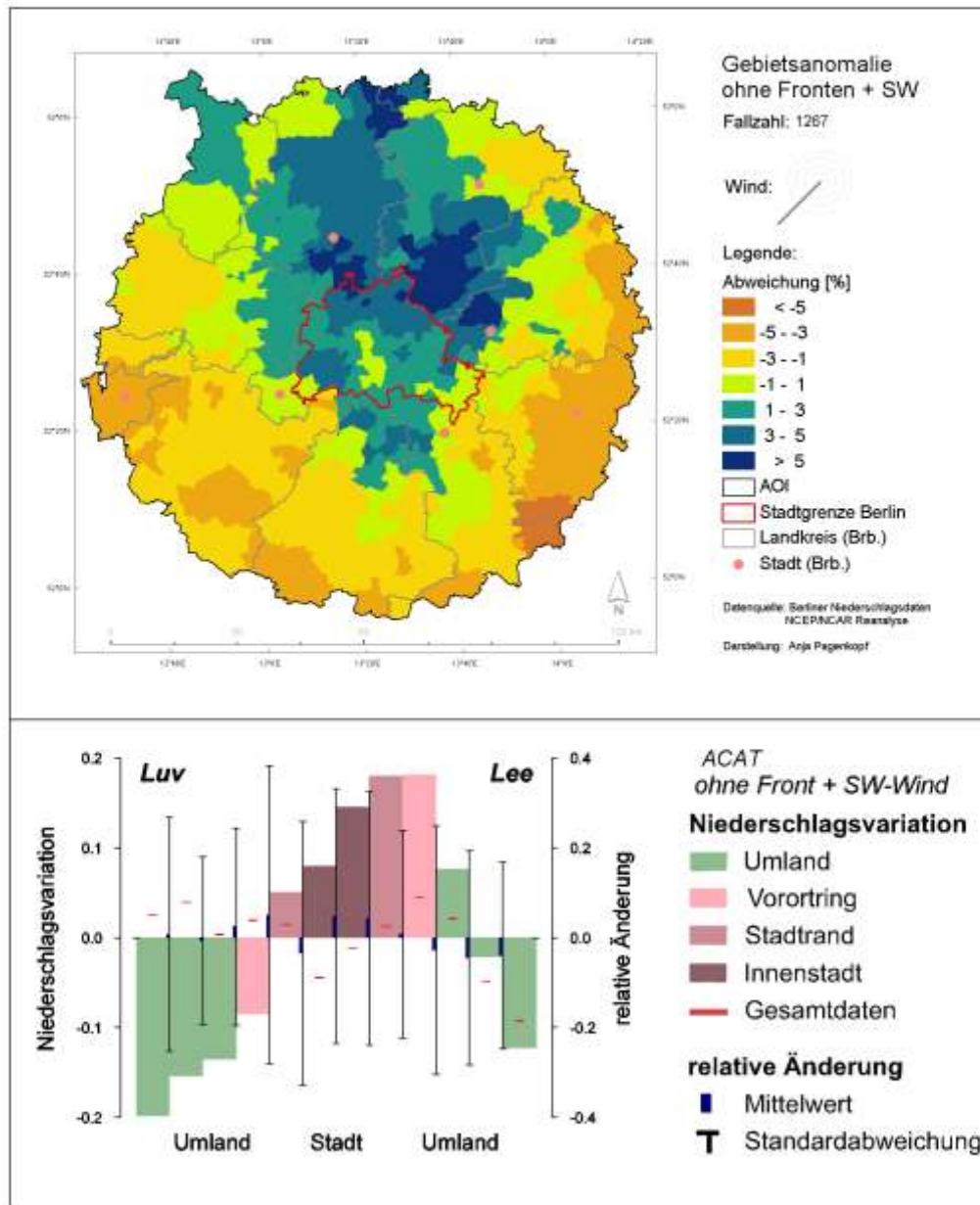
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **ohne Frontpassage bei Wind aus dem Südwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 202,5° und 247,5° lag

Fallzahl: 1267 mittlere Gesamtsumme: 2072 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 11 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm



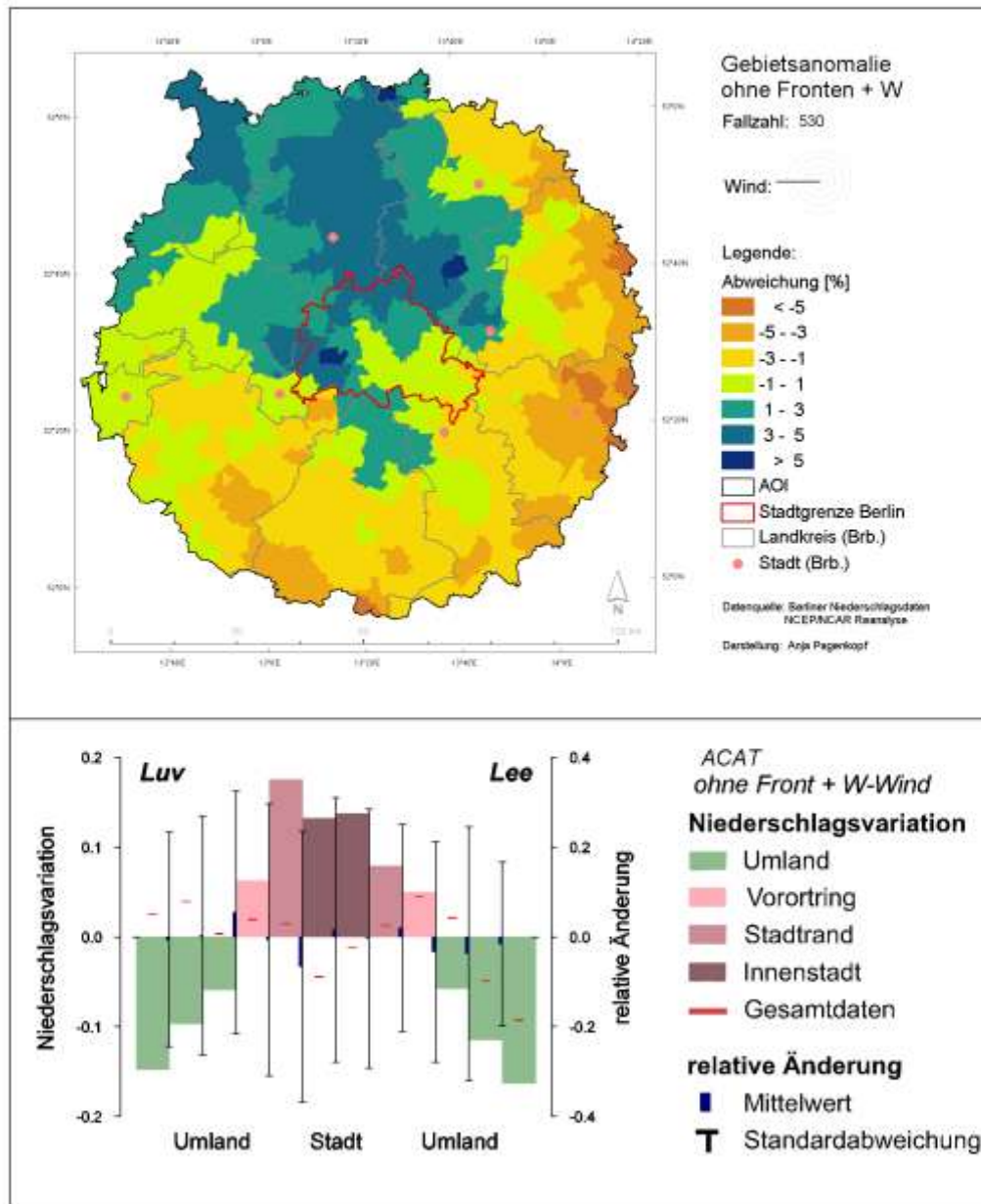
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: ohne Frontpassage bei Wind aus dem Westsektor

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 247,5° und 292,5° lag

Fallzahl: 530 **mittlere Gesamtsumme:** 831 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 4,5 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 1,6 mm



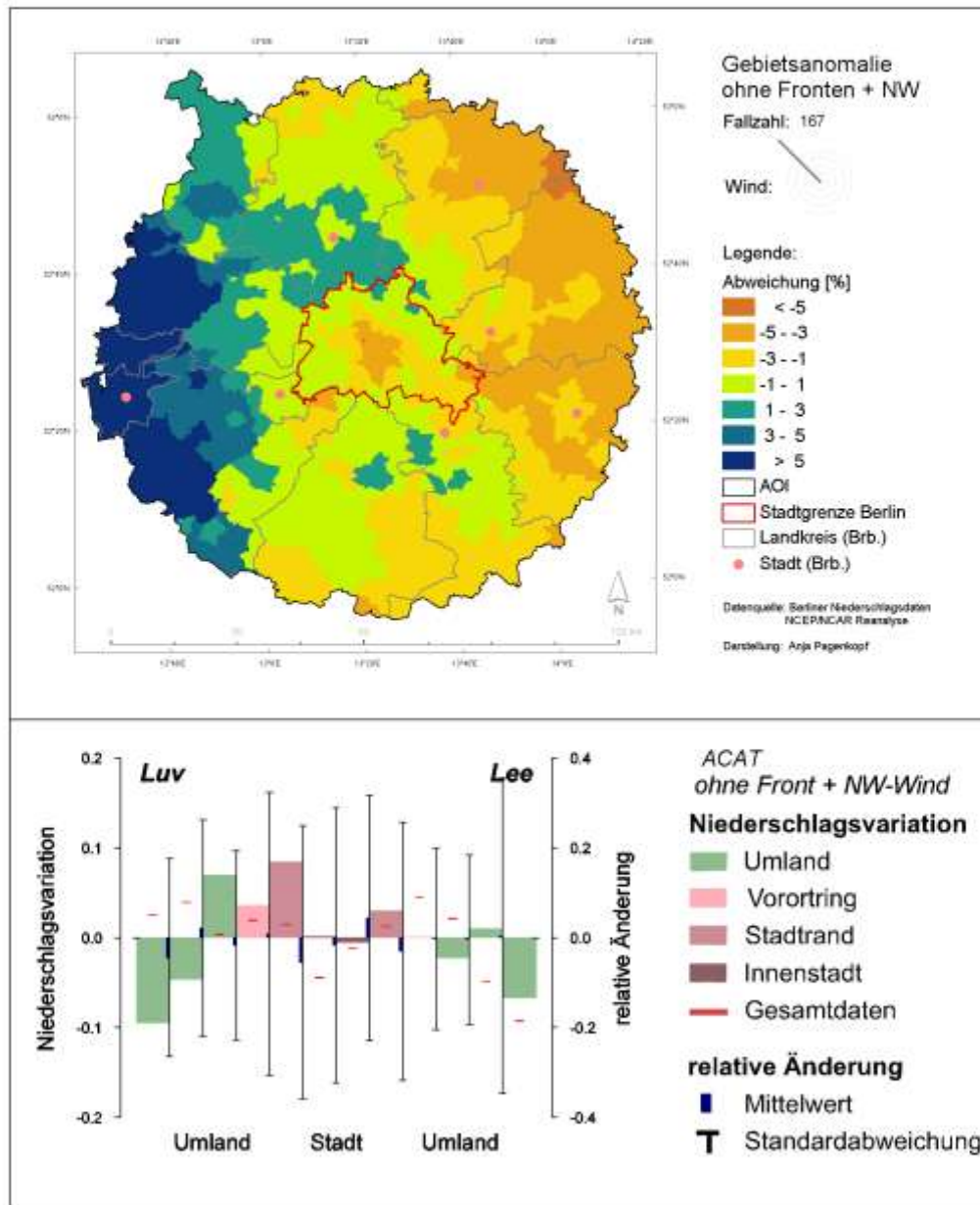
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **ohne Frontpassage bei Wind aus dem Nordwestsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 292,5° und 337,5° lag

Fallzahl: 167 mittlere Gesamtsumme: 244 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 1,4 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,5 mm



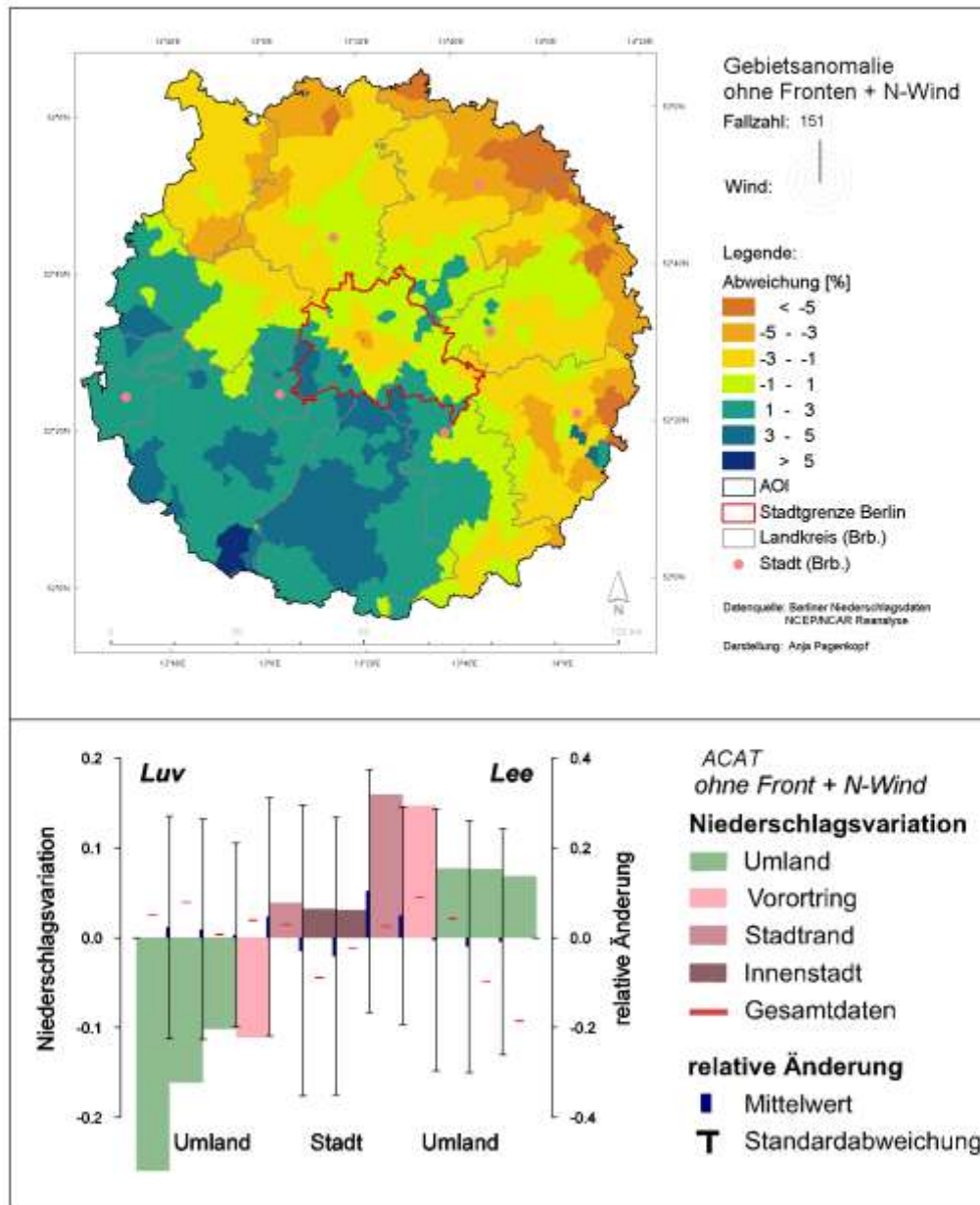
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **ohne Frontpassage bei Wind aus dem Nordsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 337,5° und 22,5° lag

Fallzahl: 151 mittlere Gesamtsumme: 210 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 1,3 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,4 mm



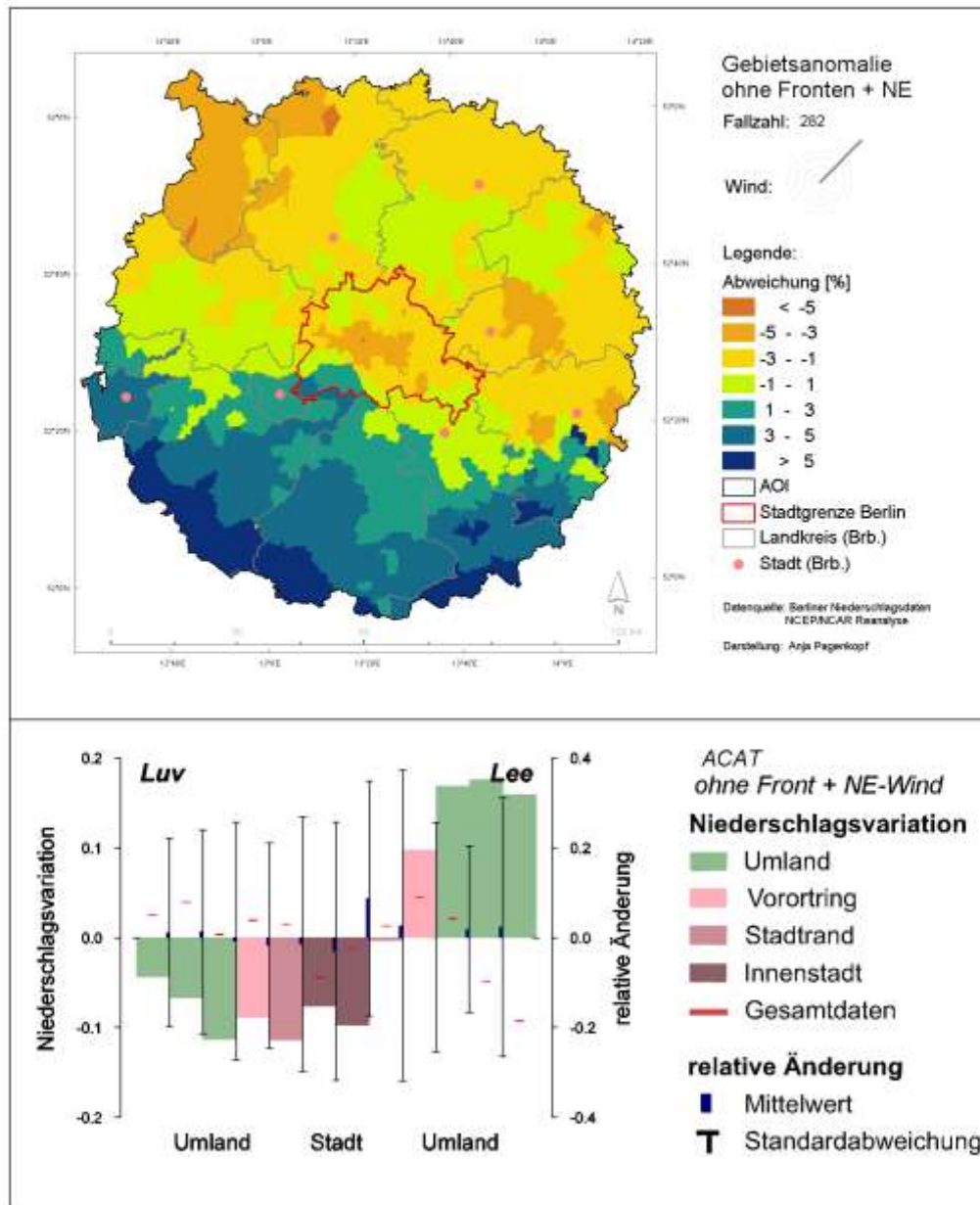
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **ohne Frontpassage bei Wind aus dem Nordostsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 22,5° und 67,5° lag

Fallzahl: 282 mittlere Gesamtsumme: 492 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 2,3 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,7 mm



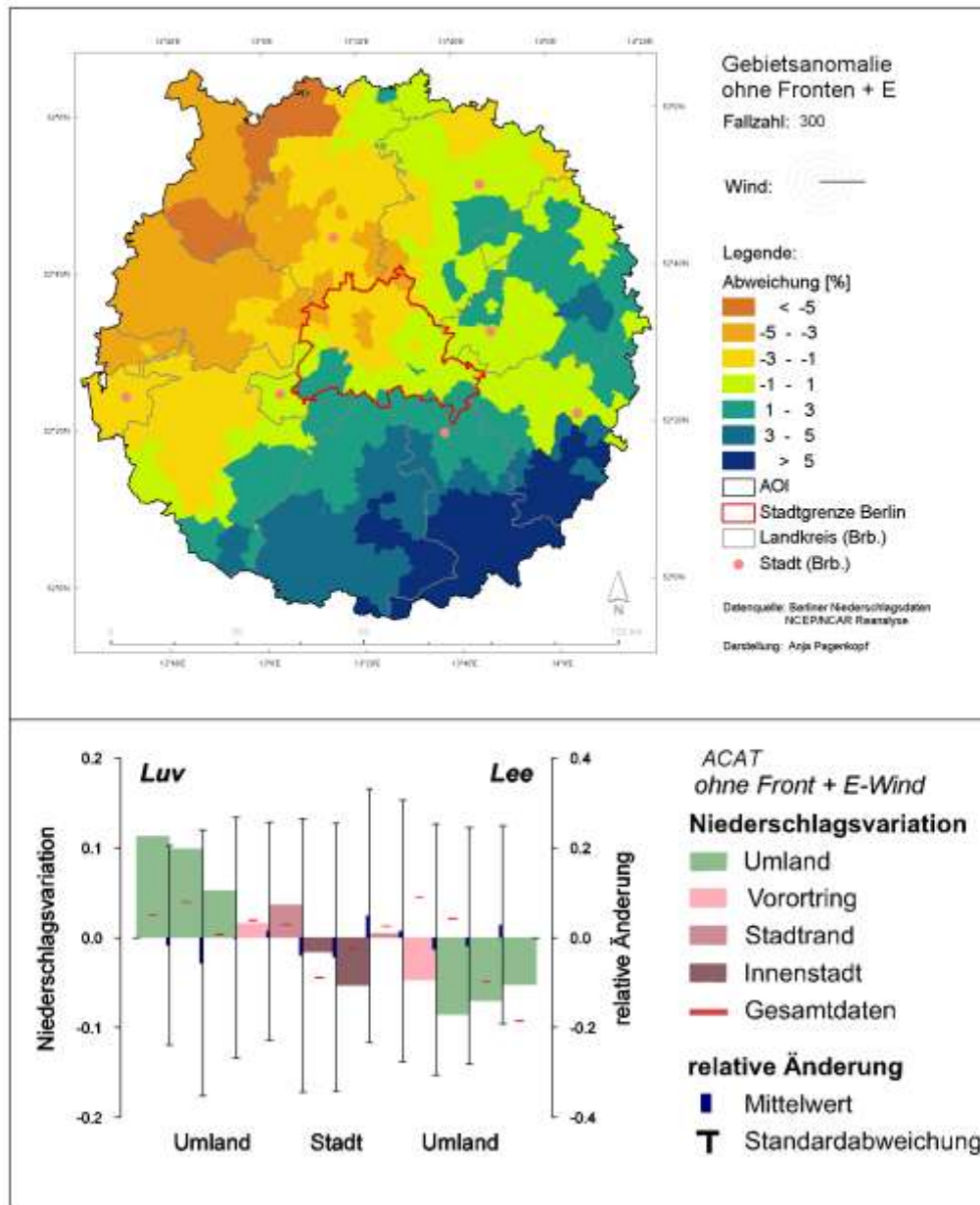
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: ohne Frontpassage bei Wind aus dem Ostsektor

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 67,5° und 112,5° lag

Fallzahl: 300 **mittlere Gesamtsumme:** 498 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 2,5 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 1,6 mm



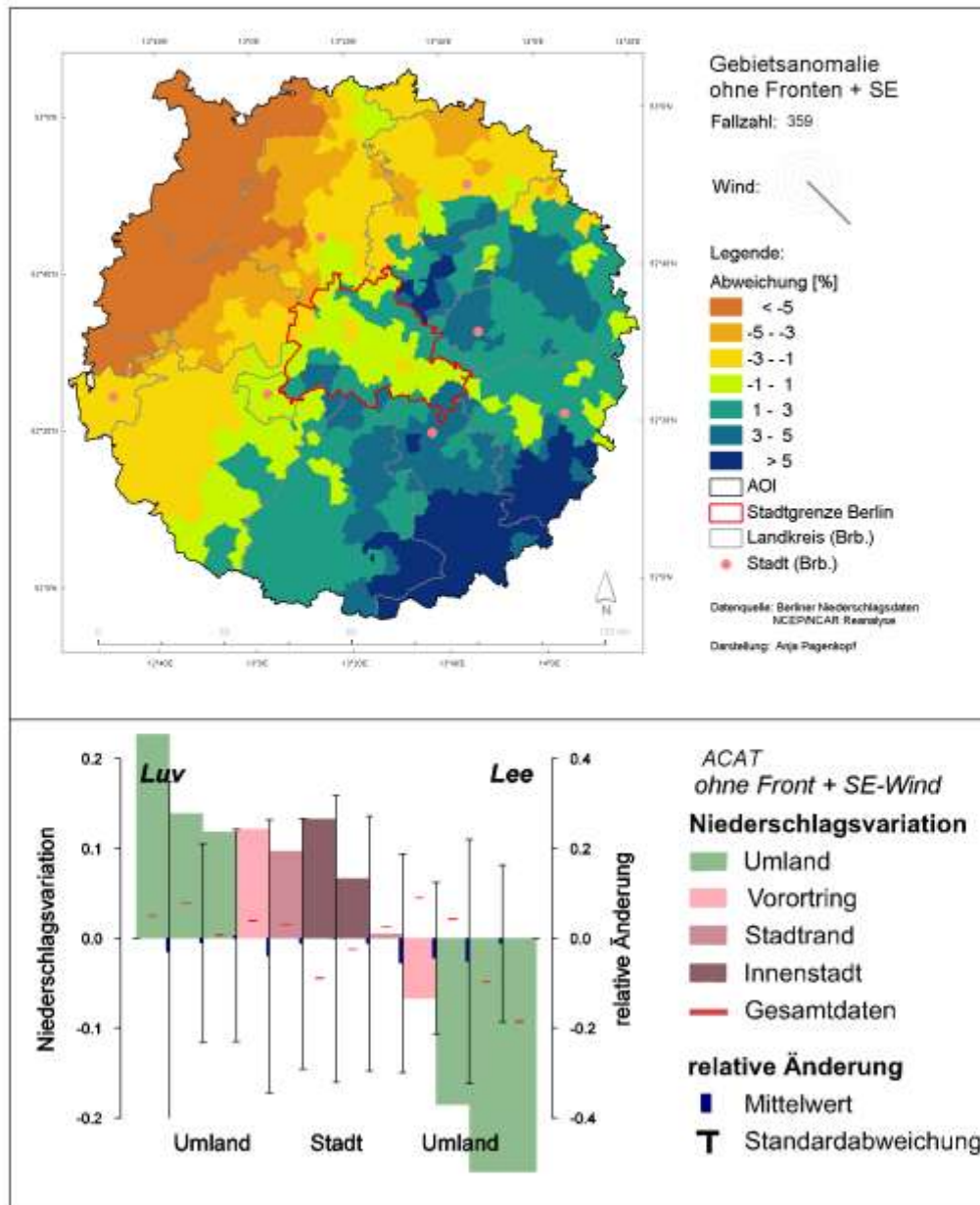
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **ohne Frontpassage bei Wind aus dem Südostsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 112,5° und 157,5° lag

Fallzahl: 359 mittlere Gesamtsumme: 601 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 3,0 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,7 mm



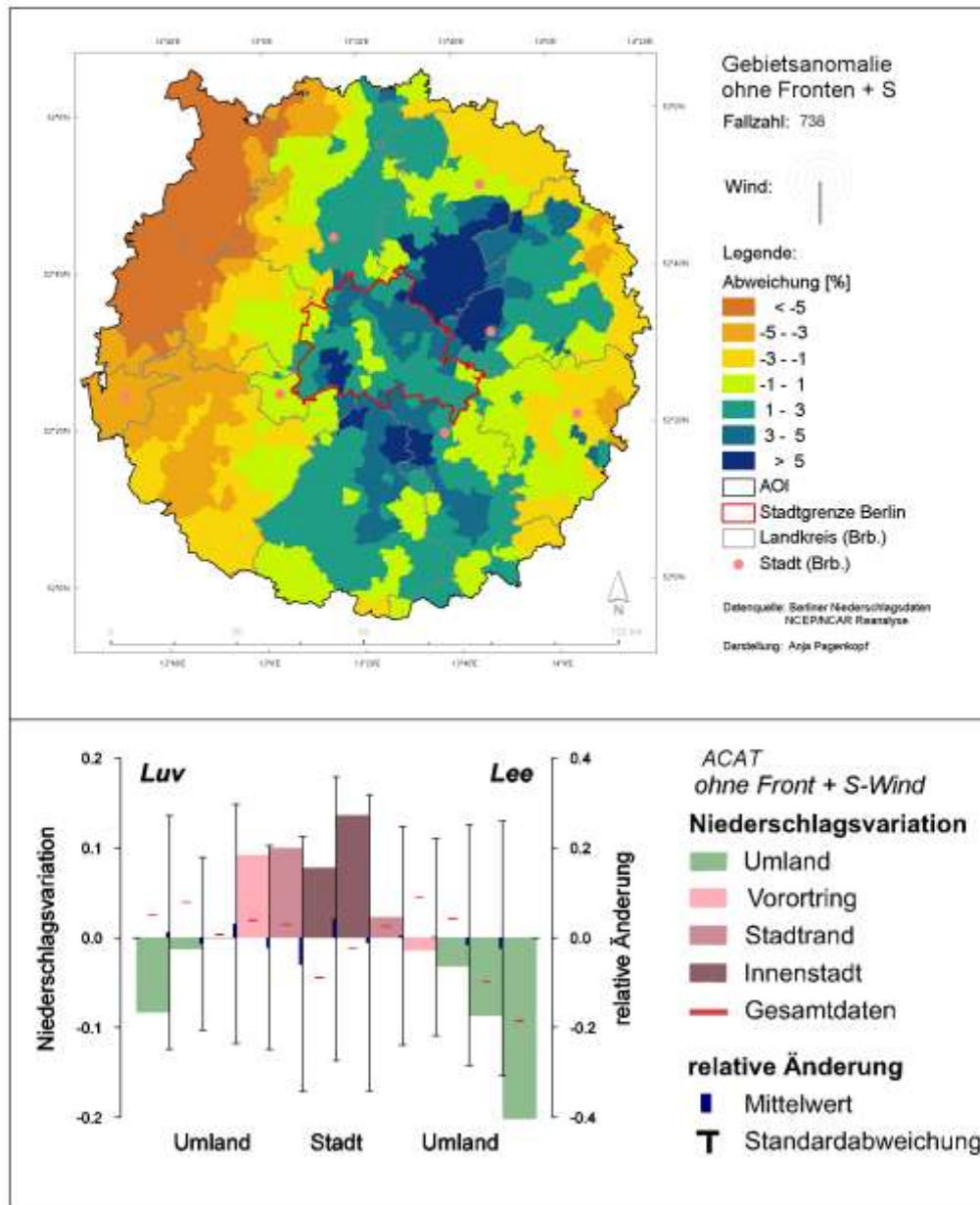
zweifaktorielles Experiment: Frontpassage, Windrichtung

Name: **ohne Frontpassage bei Wind aus dem Südsektor**

Beschreibung: Tage an denen am Meteorologischen Institut der FU Berlin eine Frontpassage über Berlin ausgewiesen wurde und die mittlere Windrichtung im Reanalyse Winddatensatz zwischen 157,5° und 202,5° lag

Fallzahl: 738 mittlere Gesamtsumme: 1164 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 6,2 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm

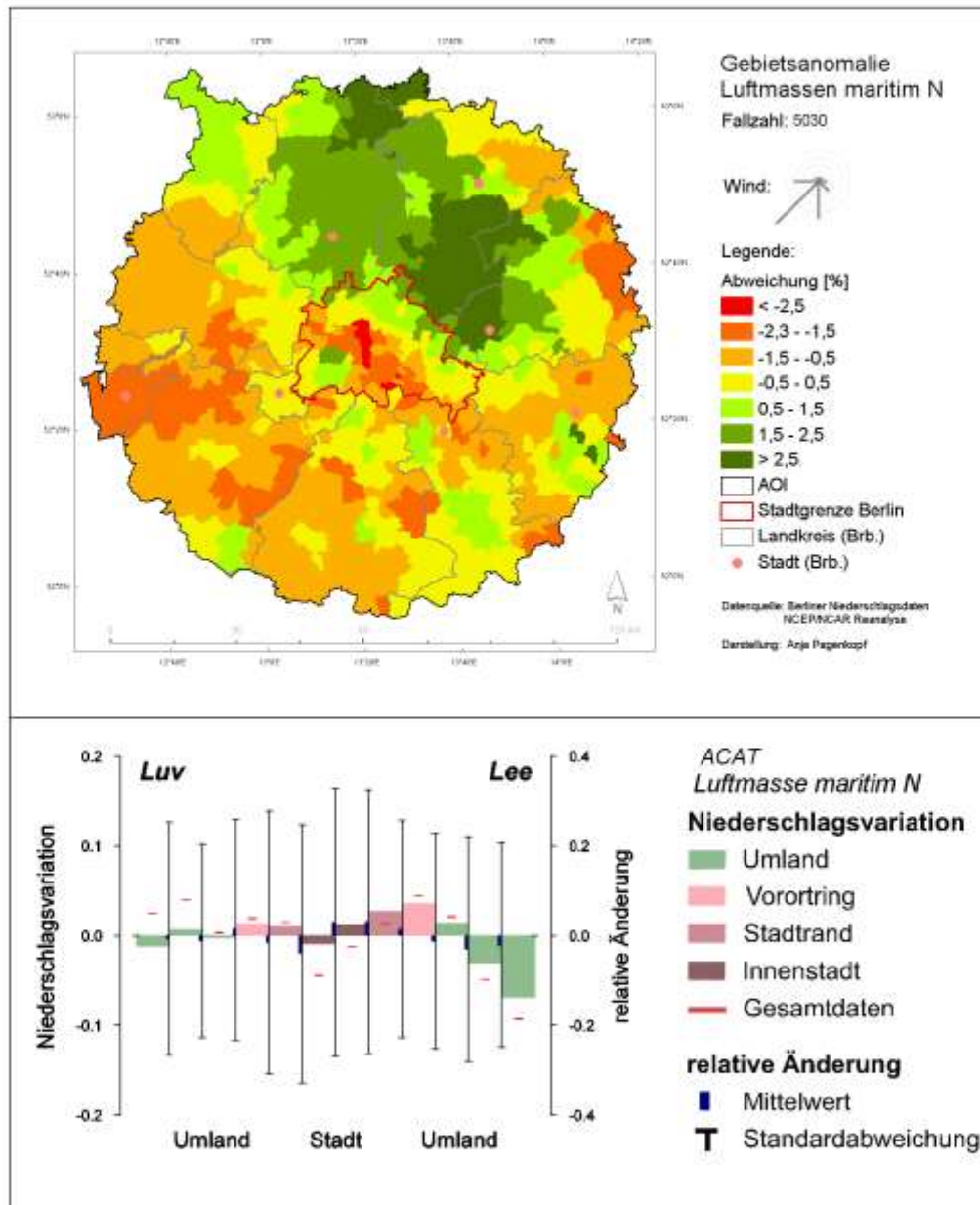


Name: **maritime Luftmassen aus dem Norden**

Beschreibung: Tage mit Luftmassen maritimen Charakters aus der Subpolar- und Polarregion

Fallzahl: 5030 mittlere Gesamtsumme: 11019 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 42 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,2 mm



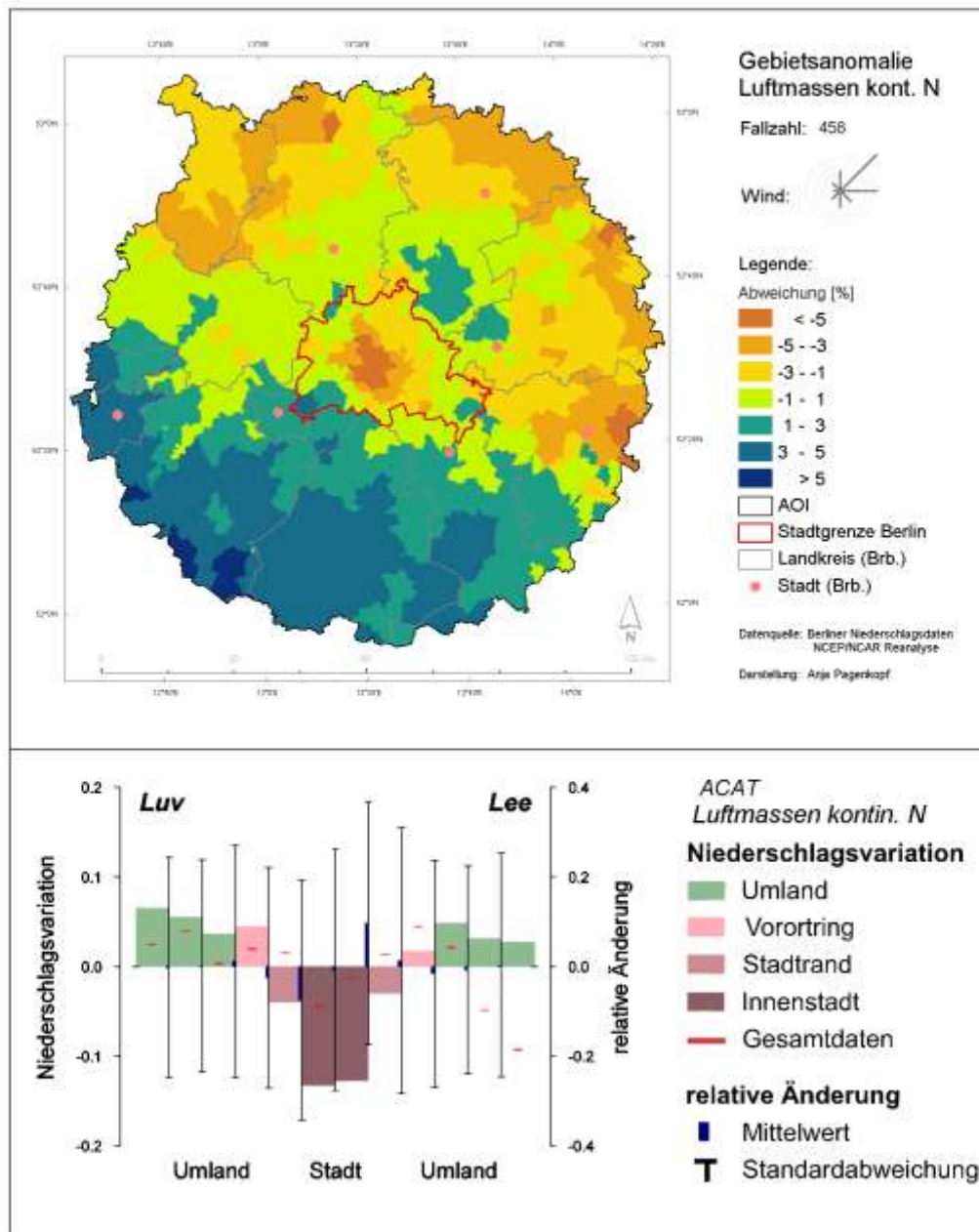
einfaktorielles Experiment: Luftmassen

Name: **kontinentale Luftmassen aus dem Norden**

Beschreibung: Tage mit Luftmassen kontinentalen Charakters aus der Subpolar- und Polarregion

Fallzahl: 458 mittlere Gesamtsumme: 755 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 3,9 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,6 mm



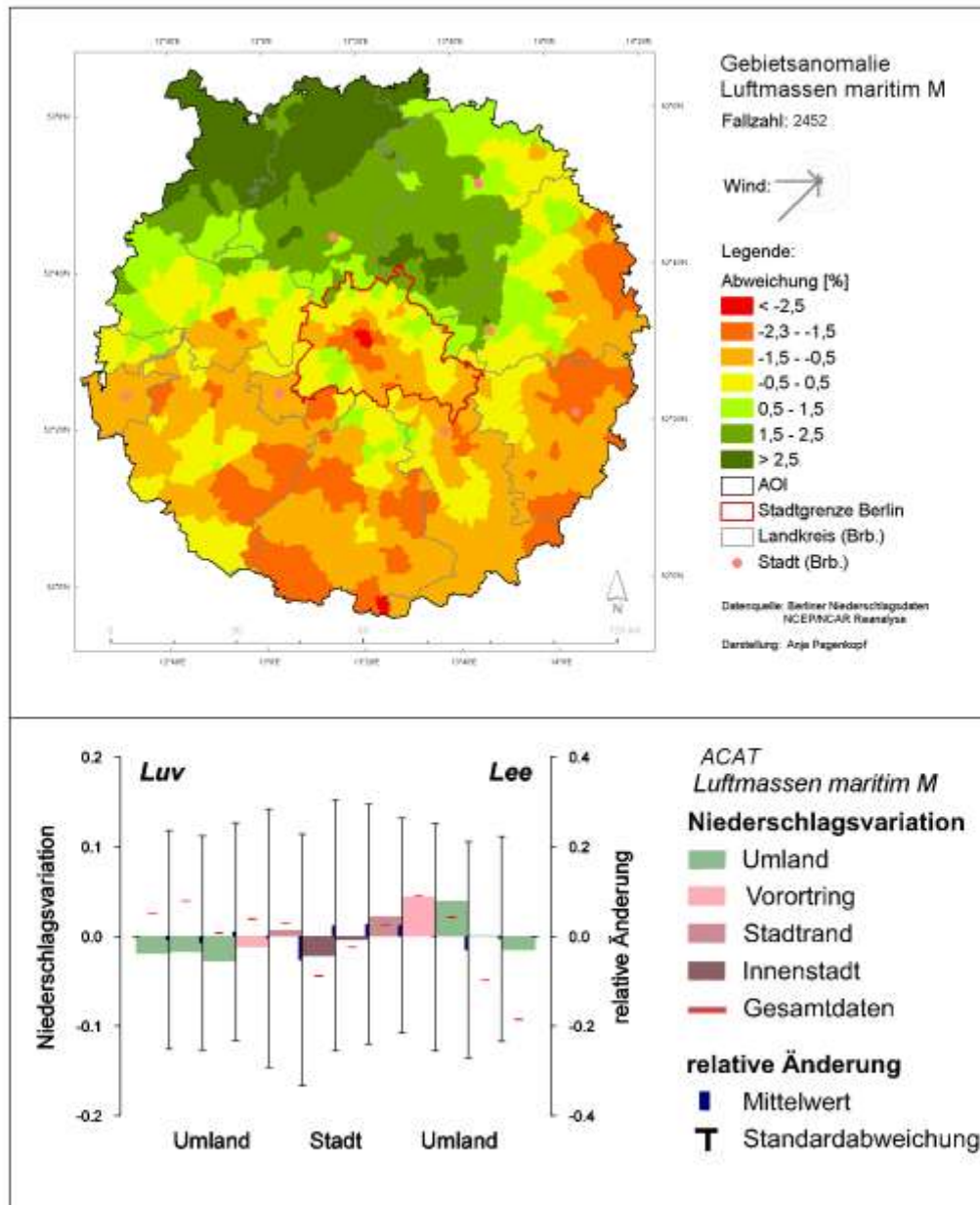
einfaktorielles Experiment: Luftmassen

Name: **maritime Luftmassen**

Beschreibung: Tage mit Luftmassen maritimen Charakters aus den Mittelbreiten

Fallzahl: 2452 mittlere Gesamtsumme: 6362 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 21 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,6 mm

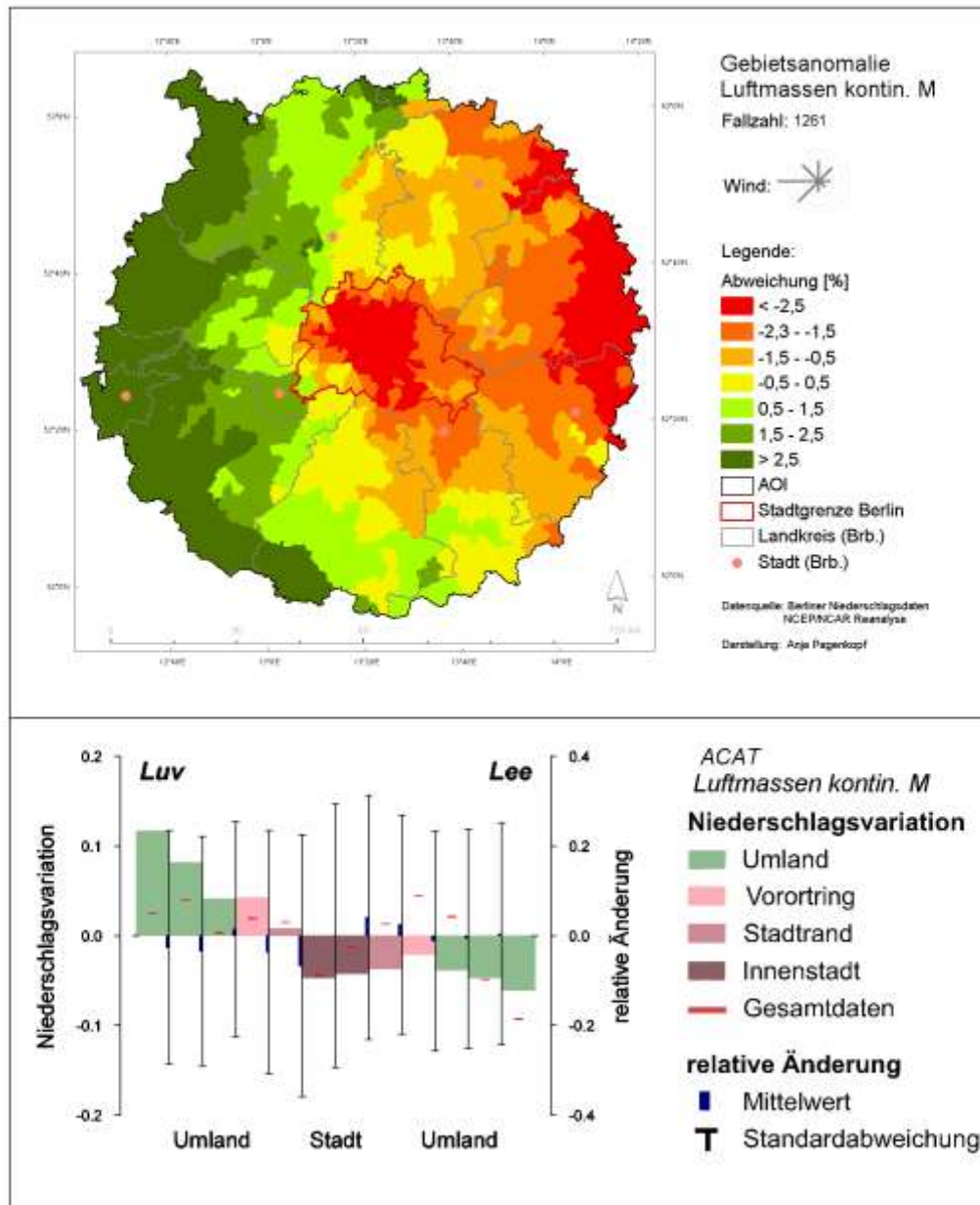


Name: **kontinentale Luftmassen**

Beschreibung: Tage mit Luftmassen maritimen Charakters aus den Mittelbreiten

Fallzahl: 1261 mittlere Gesamtsumme: 2393 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 11 % mittlere Niederschlagshöhe: 1,9 mm



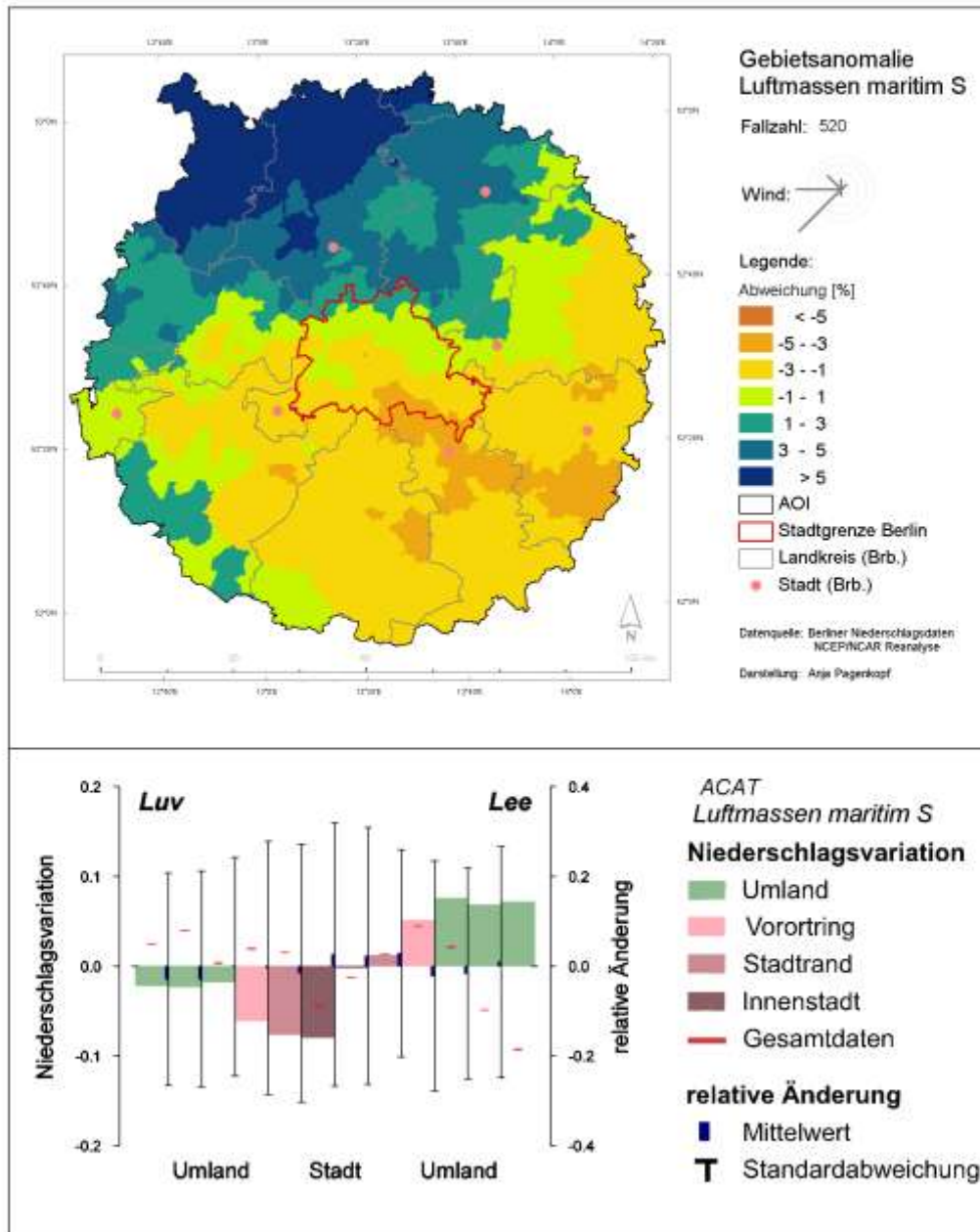
einfaktorielles Experiment: Luftmassen

Name: **maritime Luftmassen aus dem Süden**

Beschreibung: Tage mit Luftmassen maritimen Charakters aus der subtropischen und tropischen Region

Fallzahl: 520 mittlere Gesamtsumme: 1495 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 4,4 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,9 mm

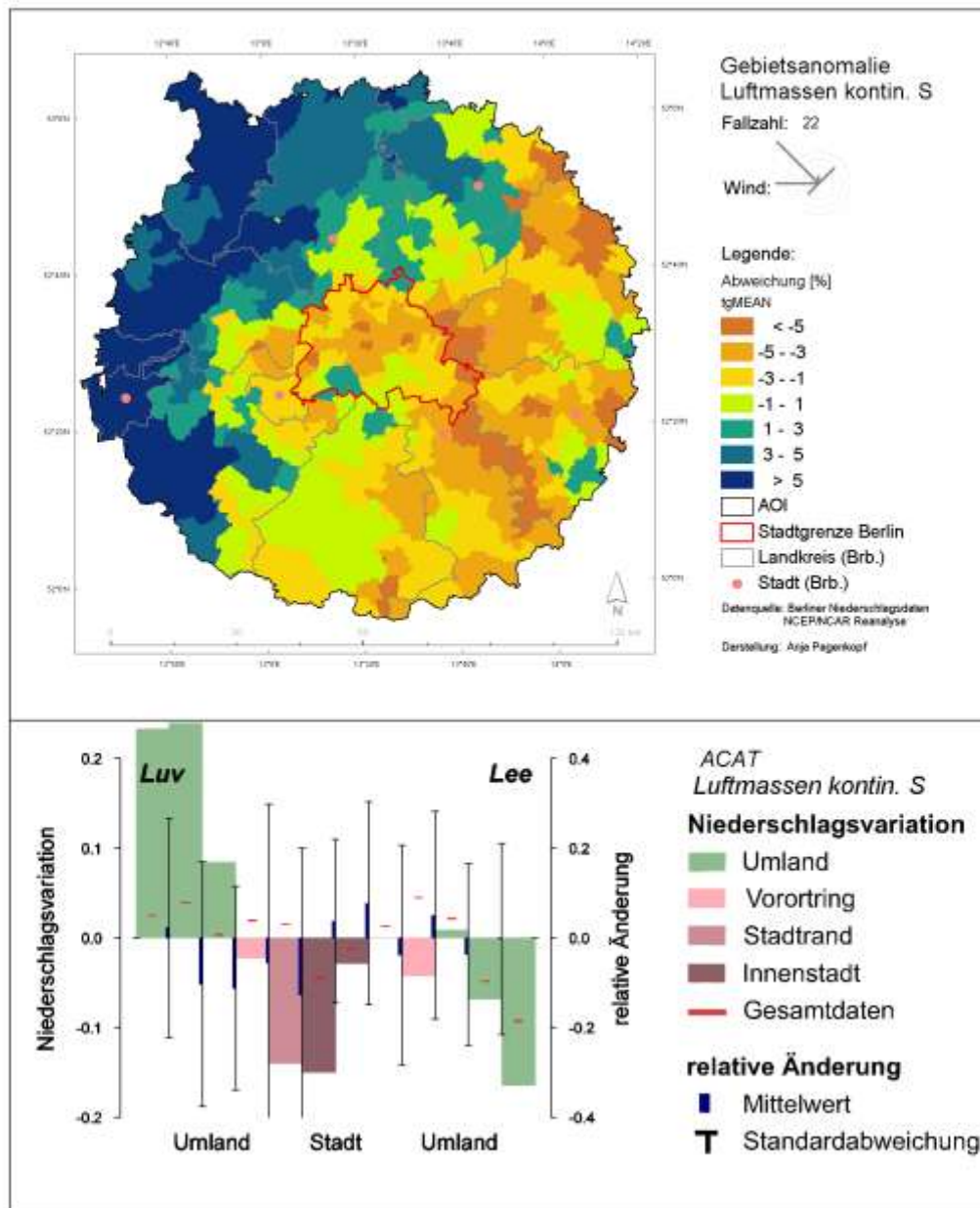


Name: kontinentale Luftmassen aus dem Süden

Beschreibung: Tage mit Luftmassen kontinentalen Charakters aus der subtropischen und tropischen Region

Fallzahl: 22 mittlere Gesamtsumme: 45 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 0,2 % mittlere Niederschlagshöhe: 2,0 mm

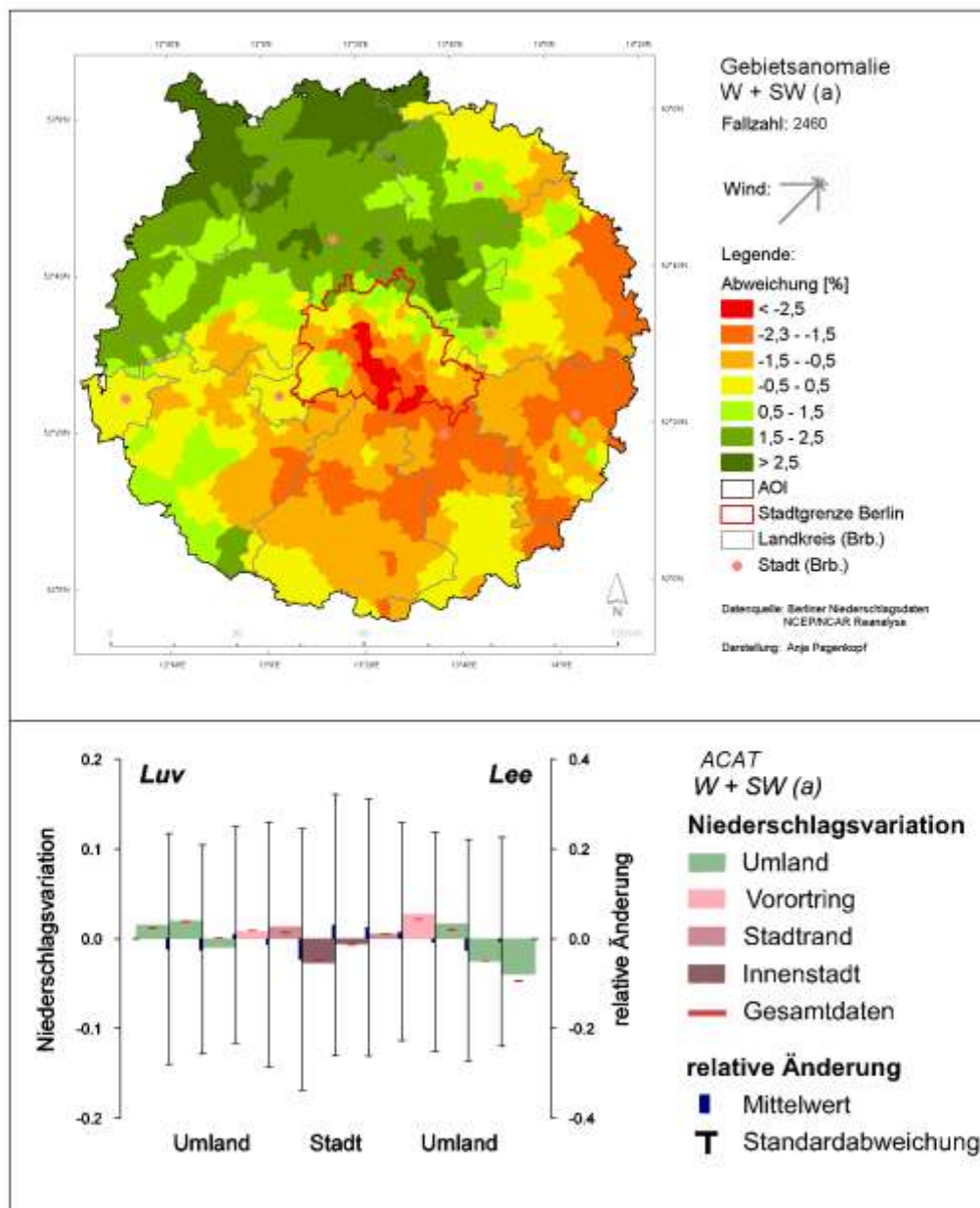


Name: antizyklonale West- und Südwestlagen

Beschreibung: Tage mit Großwetterlagen antizyklonaler Prägung mit W und SW Komponenten

Fallzahl: 2460 **mittlere Gesamtsumme:** 5415 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 21 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,1 mm



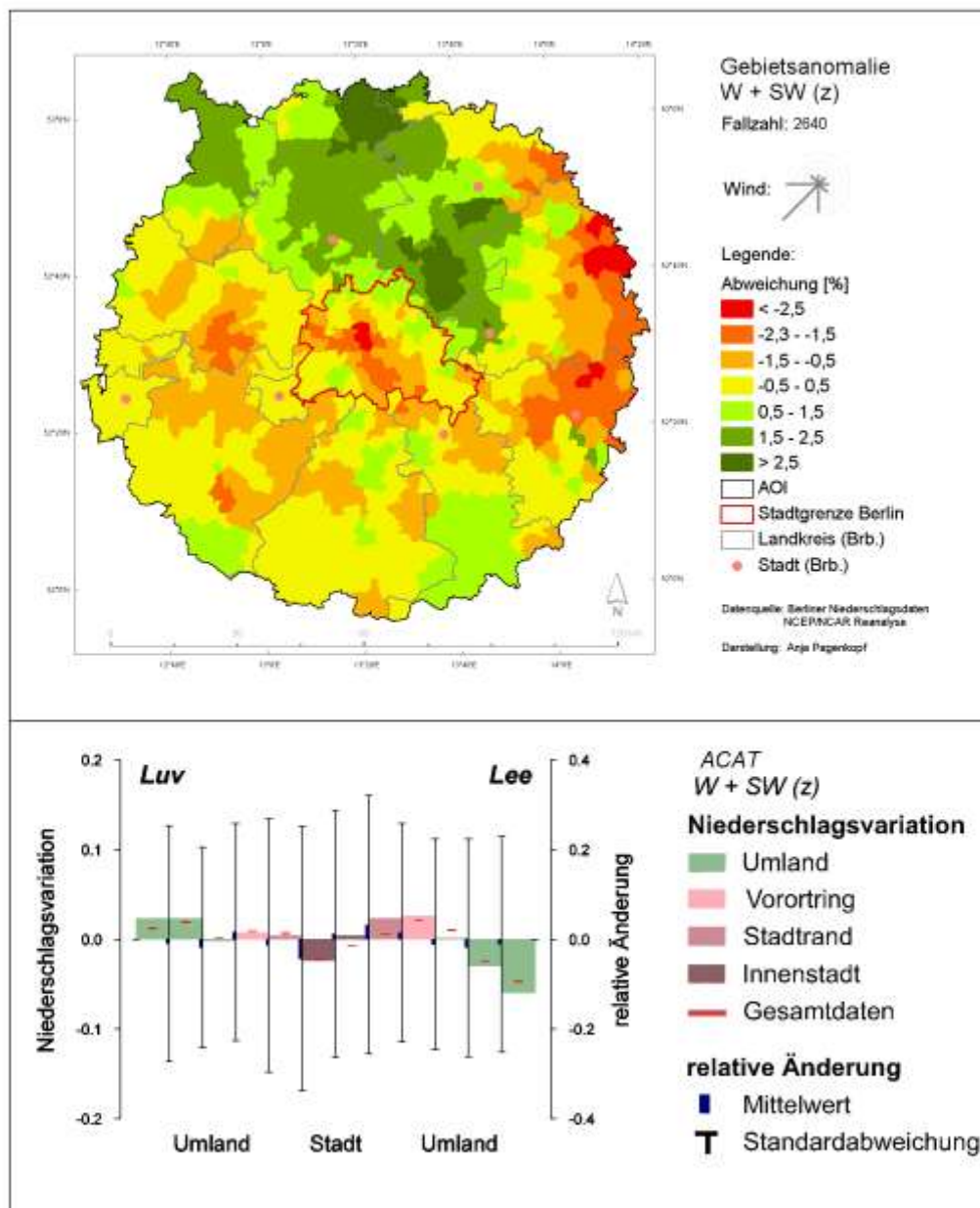
einfaktorielles Experiment: Großwettertyp (Zyklonalität)

Name: zyklonale West- und Südwestlagen

Beschreibung: Tage mit Großwetterlagen zyklonalen Prägung mit W und SW Komponenten

Fallzahl: 2640 **mittlere Gesamtsumme:** 5888 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 22 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,2 mm

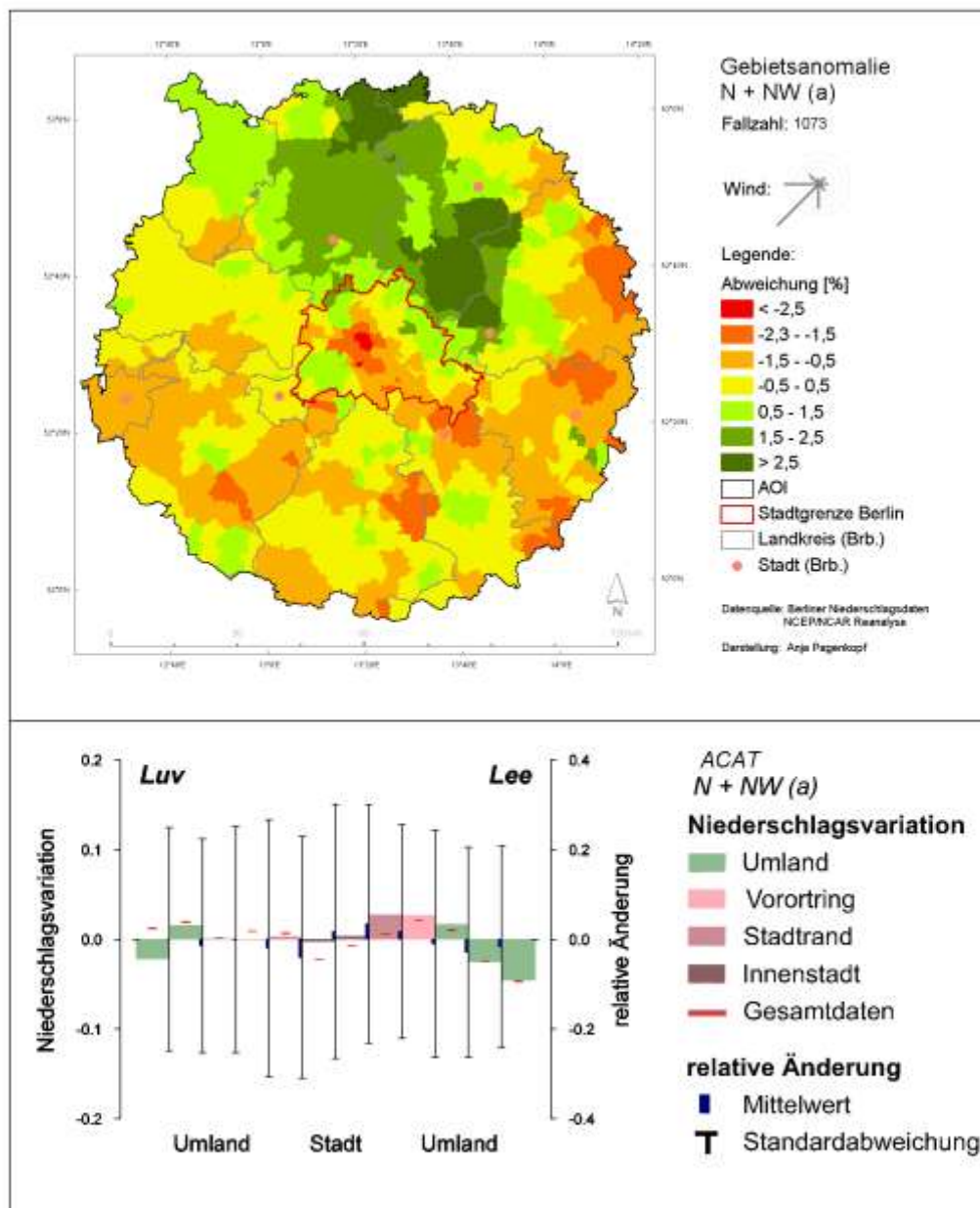


Name: antizyklonale Nord- und Nordwestlagen

Beschreibung: Tage mit Großwetterlagen antizyklonaler Prägung mit N und NW Komponenten

Fallzahl: 1073 **mittlere Gesamtsumme:** 2642 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 9 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,5 mm

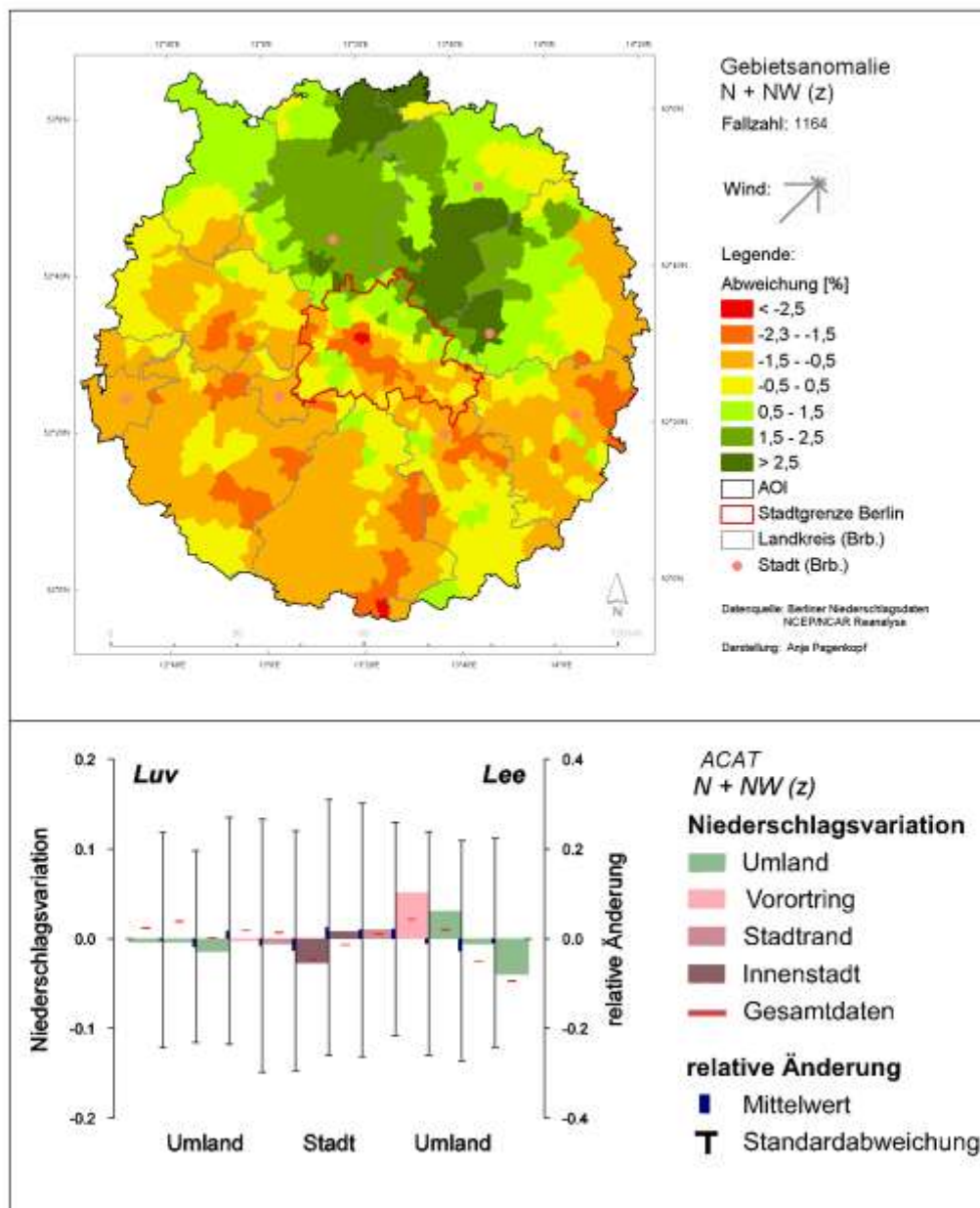


Name: zyklonale Nord- und Nordwestlagen

Beschreibung: Tage mit Großwetterlagen zyklonaler Prägung mit N und NW Komponenten

Fallzahl: 1164 **mittlere Gesamtsumme:** 2623 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 10 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,2 mm

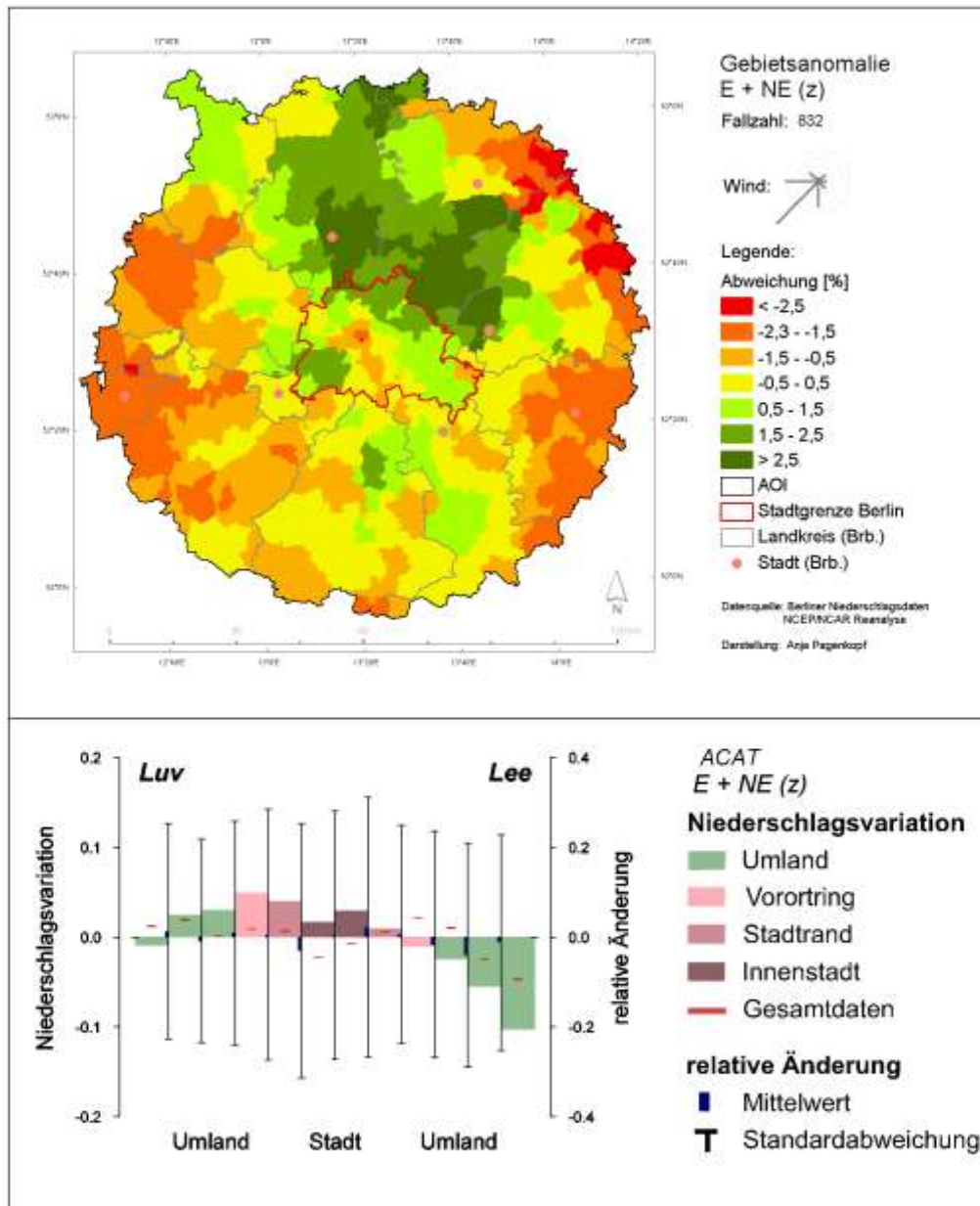


Name: zyklonale Ost- und Nordostlagen

Beschreibung: Tage mit Großwetterlagen zyklonaler Prägung mit E und NE Komponenten

Fallzahl: 832 **mittlere Gesamtsumme:** 2164 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 7 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,6 mm

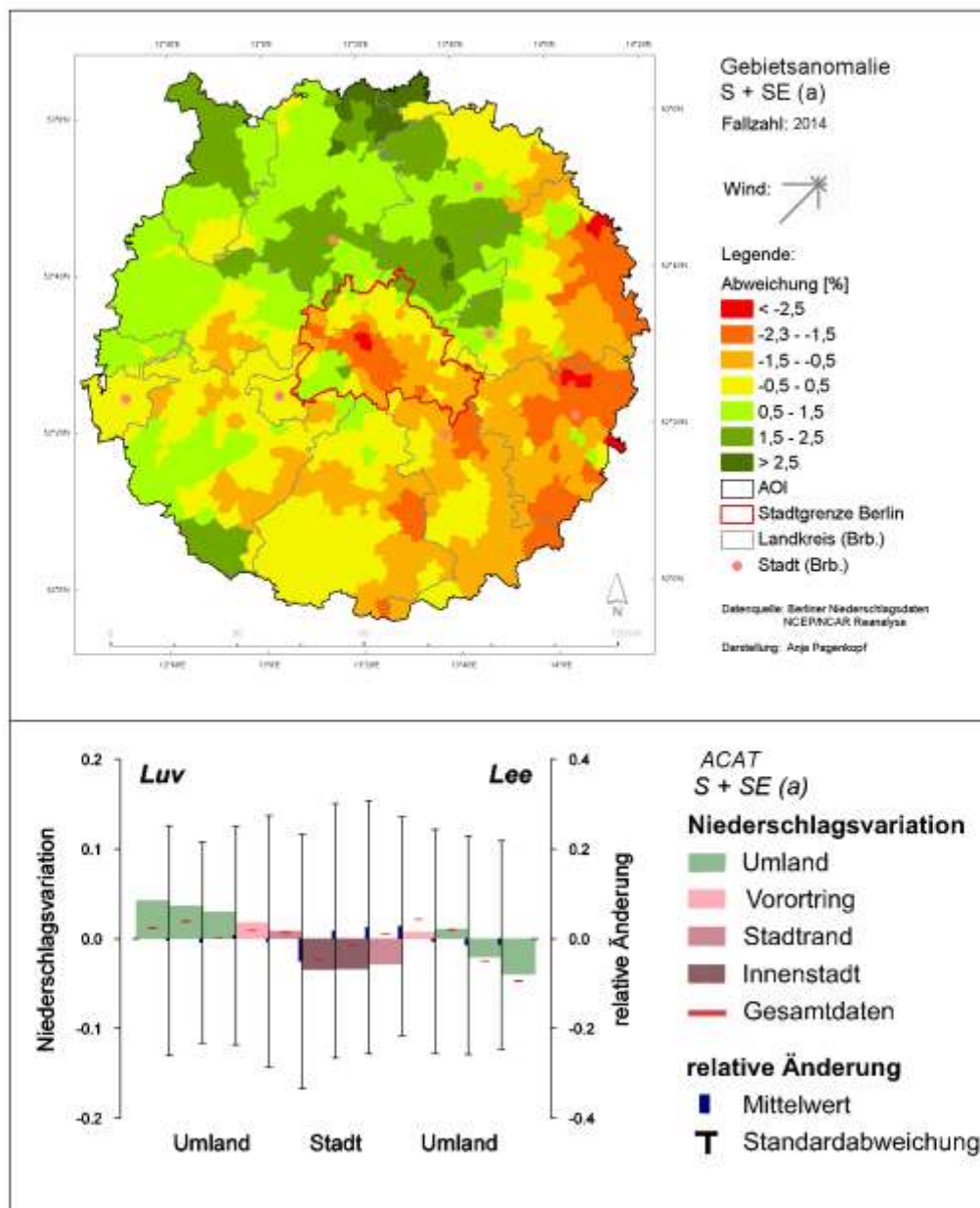


Name: antizyklonale Süd- und Südostlagen

Beschreibung: Tage mit Großwetterlagen antizyklonaler Prägung mit S und SE Komponenten

Fallzahl: 2014 **mittlere Gesamtsumme:** 4808 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 17 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,3 mm



Name: zyklonale Süd- und Südostlagen

Beschreibung: Tage mit Großwetterlagen zyklonaler Prägung mit S und SE Komponenten

Fallzahl: 830 **mittlere Gesamtsumme:** 1975 mm

Anteil an allen Niederschlagstagen: 7 % **mittlere Niederschlagshöhe:** 2,4 mm

